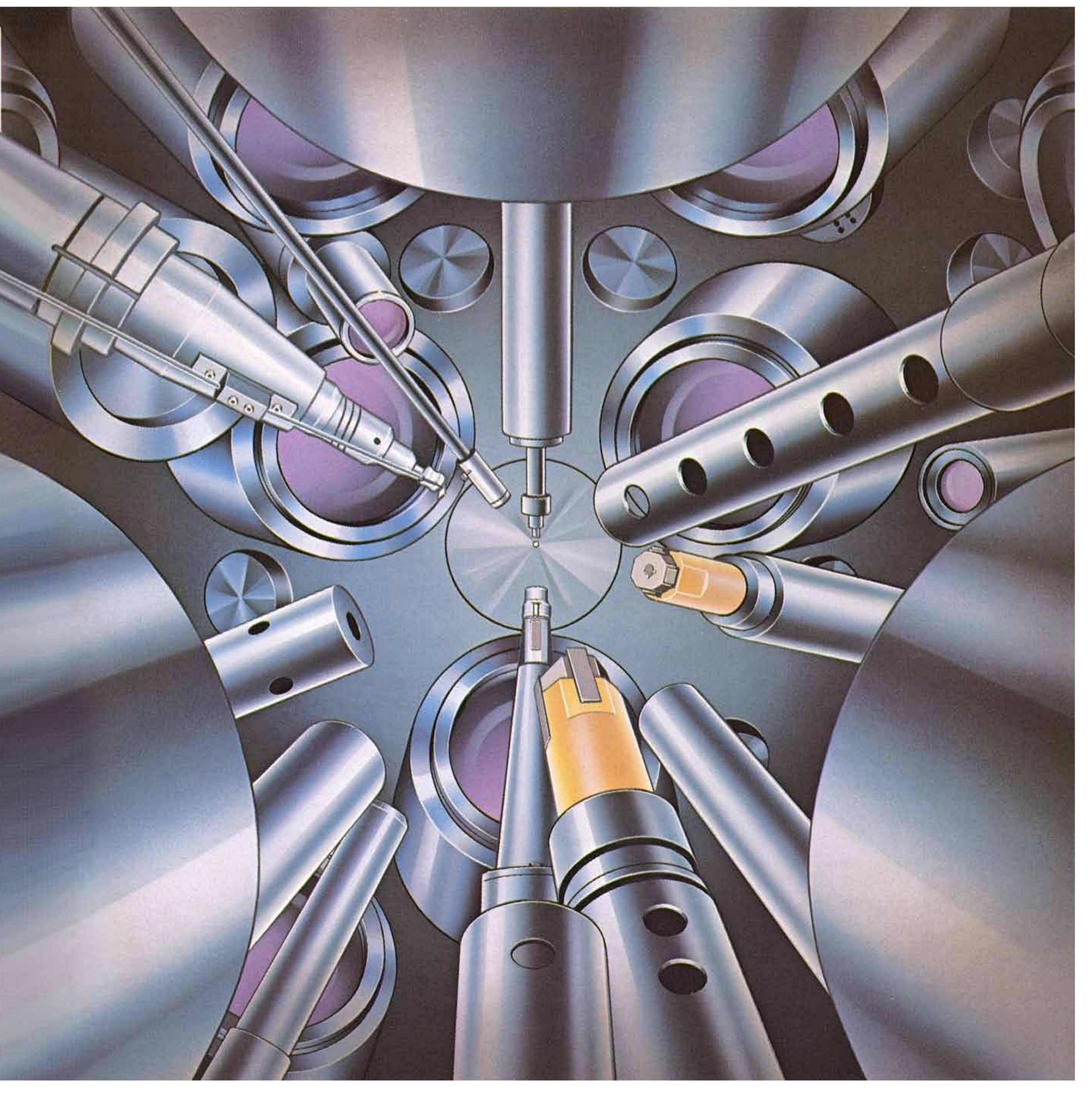
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



FUSION MEDIANTE LASER

Octubre 1986

450 Ptas.
(IVA incluido)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 121
Octubre 1986

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

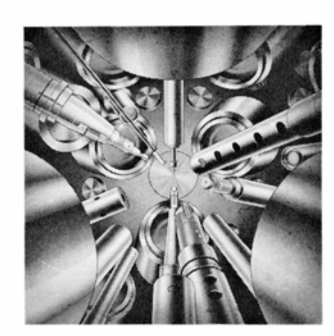
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Josep-Enric Llebot Rabagliatti: *Fuerzas nucleares estratégicas de Gran Bretaña y Francia*; Amando García Rodríguez: *Cuasicristales*; Juan Luis Sierra Ferrer: *Transplantes en el sistema nervioso central*; Carlos Pérez García: *Avances en la fusión por láser*; Manuel Crespo Veigas: *El origen del maíz*; Joandomènec Ros Aragonés: *Nichos térmicos de la lubina listada*; Elías Zamora Acosto: *El nacimiento de la civilización Maya*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Luis Alonso, Ramón Margalef, Javier de Lorenzo, Manuel García Velarde y Javier de la Rubia



PORTADA

El dibujo de portada representa el interior de la cámara blanco del sistema láser OMEGA de la Universidad de Rochester, en el que 24 haces láser enfocan simultáneamente su energía sobre una pastilla de combustible (véase "Avances en la fusión por láser", de R. Stephen Craxton, Robert L. McCrory y John M. Soures, en este número). La pastilla es la esfera brillante del centro del dibujo. Consta de un recubrimiento hueco de vidrio, de un milímetro de diámetro aproximadamente, que contiene un gas de deuterio y tritio. Los núcleos atómicos del gas se funden cuando recubrimiento y gas son comprimidos y calentados por el láser; la reacción de fusión puede producir energía útil. La pastilla se encuentra suspendida de un filamento. Cada haz láser ha de atravesar una lente y un escudo que protege a ésta de los desechos despedidos al evaporarse la pastilla.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Hank Iken

Página	Fuente	Página	Fuente
15	Ministerio de Defensa de Gran Bretaña	64	Quesada/Burke
16-22	Ian Worpole	66	Paul C. Mangelsdorf (*izquierda y centro*), Tom Prentiss (*derecha*)
24	Saxe Patterson	67-69	Tom Prentiss
26-32	George V. Kelvin	70	Bobbe Baker
34	Leonid A. Bendersky y Robert J. Schaefer	73	Ch. Uhl y J. Saldarriaga
37	Anders Björklund (*arriba*), Carol Donner (*abajo*)	74-81	Ch. Uhl, J. Saldarriaga y Ricardo Génova
38	Alan Fine	82-83	Enid Kotschnig
39-44	Carol Donner	84-88	Patricia J. Wynne
51	James Kilkelly	91	Norman Hammond
52-56	Gabor Kiss	92-93	Alan D. Iselin
57	Frederic J. Marshall, Universidad de Rochester	94-98	Normann Hammond
60	Groot Gregory, Universidad de Rochester (*arriba*); Johny Johnson (*abajo*)	99	Lowell Georgia, © National Geographic Society
61	Eugene Kowaluk, Universidad de Rochester	100	Norman Hammond (*arriba*), Alan D. Iselin (*abajo*)
62	Gabor Kiss	104-106	Ilil Arbel
63	Bruce LaFontaine, Universidad de Rochester	109-111	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

JOHN PRADOS, JOEL S. WIT y MICHAEL J. ZAGUREK, JR. ("Fuerzas nucleares estratégicas de Gran Bretaña y Francia") comparten un interés común por la política de defensa y de control de armamentos. Prados, que obtuvo su doctorado en ciencias políticas por la Universidad de Columbia, ha escrito varios libros, entre los que queremos mencionar *The Soviet Estimate: U.S. Intelligence Analysis and Russian Military Strength* (Princeton University Press, 1986) y *The President's Secret Wars* (William Morrow and Company, de próxima aparición). Ha diseñado gran número de juegos de simulación de guerra. Wit, analista del Servicio de Inteligencia e Investigación del Departamento de Estado norteamericano, estudió en Columbia. Ha ocupado varios cargos relacionados con cuestiones de la seguridad nacional y recientemente ha sido consejero del Servicio de Investigación del Congreso, de la Biblioteca del Congreso de los Estados Unidos. Zagurek, que trabaja para la Digital Equipment Corporation, se licenció por la Escuela de Asuntos Públicos e Internacionales de Columbia en 1979. Se ha dedicado durante algunos años al diseño y programación para ordenadores de simulaciones de la guerra nuclear. Las opiniones expuestas por los autores en este artículo son propias, y no representan necesariamente las de las instituciones donde trabajan.

DAVID R. NELSON ("Cuasicristales") es profesor de física de la Universidad de Harvard. Tras concluir su doctorado en 1975 trabajó como investigador adjunto en Cornell y más tarde se trasladó becado a Harvard. En 1978 se incorporó al claustro docente de este último centro que, en 1980, le nombró catedrático. En 1984 recibió una beca MacArthur de cinco años. Nelson está interesado en las transiciones de fase, turbulencias, cristales líquidos y mecánica estadística de los vidrios.

ALAN FINE ("Transplantes en el sistema nervioso central") trabja en la unidad de neurobiología molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge, Inglaterra. Cursó el primer ciclo universitario en Harvard, intercalando estancias de algunos años en Francia e Israel, y se licenció en fisiología por la Universidad de Pennsylvania. Desarrolló estudios de postdoctorado en el Instituto Nacional estadounidense de Salud Mental y en el Instituto Weizmann de Ciencias de Israel, en ambos casos en calidad de becario. Desde 1983 está en Cambridge.

R. STEPHEN CRAXTON, ROBERT L. McCRORY y JOHN M. SOURES ("Avances en la fusión por láser") trabajan en el laboratorio de energética de láseres de la Universidad de Rochester. Licenciado en matemáticas, por la Universidad de Cambridge, Craxton se doctoró en física por el Imperial College de Ciencia y Tecnología de Londres. Concluidos sus estudios, Craxton se incorporó a la Universidad de Rochester, donde su interés científico se ha centrado en las simulaciones por ordenador de plasmas producidos por láser. McCrory, licenciado y doctor por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, enseña ingeniería mecánica en la Universidad de Rochester y dirige el laboratorio de energética de láseres. Trabajó en el Laboratorio Nacional de Los Alamos antes de incorporarse a la Universidad de Rochester. Ha ocupado los cargos de vicepresidente y consejero de la compañía Consortium for Scientific Computing, Inc., y ha sido consultor de varias organizaciones privadas y públicas. Soures es director adjunto del laboratorio de energética de láseres y preside la división de desarrollo experimental. Procede de la Universidad de Rochester, que le concedió la licenciatura en física (1965) y el doctorado en ciencias mecánicas y aerospaciales (1970). Se ocupa del diseño y desarrollo de láseres de alta potencia.

PAUL C. MANGELSDORF ("El origen del maíz") dirige con carácter honorífico la cátedra Fisher de historia natural de la Universidad de Harvard. Autoridad en la genética del maíz, ha dedicado la mayor parte de su carrera al estudio de esa gramínea. Hijo de un florista y vendedor de semillas de Kansas, Mangelsdorf se interesó pronto por el cultivo de las plantas y estudió técnicas de cruzamiento vegetal en el Colegio estatal de Kansas y en la Universidad de Harvard, institución que le otorgó el doctorado en 1925. Durante 13 años desarrolló, en la Estación Agrícola Experimental de Texas, nuevas variedades de maíz, trigo, avena y cebada, retornando seguidamente a Harvard para dar clases (1940) y dirigir su museo de botánica. También ha ejercido largo tiempo de consejero agrícola de programas auspiciados por la Fundación Rockefeller en México y Sudamérica. En 1986 se retiró a Chapel Hill, contratado por la Universidad de Carolina del Norte.

CRISTOPHER UHL y JUAN SALDARRIAGA ("Fragilidad de la pluviselva amazónica") muestran su preocupación por la acelerada deforestación del bosque amazónico y centran sus investigaciones en torno a la capacidad regenerativa de este ecosistema. Uhl se doctoró en ecología vegetal en la Universidad estatal de Michigan, en 1980. Tras realizar estudios de postdoctorado en el Instituto de Ecología de la Universidad de Georgia, la Universidad estatal de Pennsylvania le incorporó a su profesorado. Está trabajando en la elaboración de métodos adecuados para acelerar la regeneración del bosque amazónico en regiones degradadas por su uso en la producción de ganado en Brasil. Juan Saldarriaga se doctoró en la Universidad de Tennessee, donde sigue investigando en la historia de la vegetación amazónica, en particular, en torno al efecto del fuego sobre los ecosistemas de la región del Amazonas.

CHARLES C. COUTANT ("Nichos térmicos de la lubina listada") dirige el programa del ciclo global del carbono en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge. Cursó estudios en la Universidad de Lehigh, por la que se doctoró en 1965. Tras investigar en el Battelle Memorial Institute se trasladó a Oak Ridge, donde ha ocupado varios cargos en la división de ciencias ambientales. A lo largo de la mayor parte de su carrera, Coutant ha estudiado el impacto de la actividad humana sobre el ambiente y, en particular, los efectos de las presas y de las centrales de energía sobre la ecología de ríos y arroyos.

NORMAN HAMMOND ("El nacimiento de la civilización maya") es profesor de arqueología, antropología y mundo clásico de la Universidad de Rutgers; es, asimismo, director del programa de investigación arqueológica de ese centro. Doctor por la Universidad de Cambridge en 1973, trabajó, becado, en el Centro de Estudios Latinoamericanos. Posteriormente enseñó en la Universidad de Bradford, Inglaterra, y en la de California en Berkeley; en 1977 ingresó en Rutgers. A partir de 1970 ha dirigido investigaciones de yacimientos mayas. Además de esa cultura, le interesan los asentamientos primitivos y las comunicaciones transandinas al sur de Ecuador.

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Rodrigo Zamorano sucedió a Alonso de Chaves como "piloto mayor" de la Casa de la Contratación, de Sevilla. Este relevo es generalmente considerado como el hito que separa las dos grandes etapas en las que dicha institución fue el principal núcleo de las actividades relacionadas con la náutica, ya que Chaves había sido su figura central a partir de 1524 y Zamorano lo sería igualmente hasta su jubilación en 1613.

Como es sabido, la Casa de la Contratación de las Indias fue fundada en 1503 como órgano del poder real para controlar el movimiento de hombres y mercancías con América. Además de funciones de tipo administrativo, atendió otras relacionadas con la técnica de la navegación, que la convirtieron en una de las más tempranas instituciones modernas relacionadas con la ciencia aplicada.

La ocupación que protagonizó el esfuerzo que se desarrolló en la institución sevillana fue la de "cosmógrafo", ejemplo típico de tarea científica que comenzó en este siglo a cobrar autonomía social. Su perfil fue concretándose a partir del período de los Reyes Católicos, precisamente en relación con los problemas náuticos y geográficos que planteó el descubrimiento y explotación de América. La importancia social de estos problemas permitió que un número creciente de personas pudiera ganarse la vida con una actividad basada en su sólida formación en cosmografía y también en matemáticas, geografía y otras materias científicas afines. La mayoría había cursado estudios universitarios, aunque había también casos de autodidactas, en especial antiguos marinos. Los más afortunados ocuparon los puestos de trabajo destinados a cosmógrafos que, como veremos a continuación, se crearon en la Casa de Contratación, en el Consejo de Indias y en otras instituciones. Otros vivieron fundamentalmente de la fabricación y venta de instrumentos y de cartas para la navegación, asociada en mayor o menor grado a la práctica de la astrología. El cosmógrafo no era el que construía materialmente los astrolabios, ballestillas y otros instrumentos del arte de navegar, sino que dirigía el trabajo de "oficiales" u obreros manuales más o menos especializados, que fabricaban las piezas conforme a sus indicaciones. Los llamados "maestros de hacer cartas", aunque estrechamente ligados a los cosmógrafos, sobre todo a los más modestos, constituían una ocupación artesanal de notable tradición en Mallorca. Las necesidades resultantes de la gran empresa americana absorbieron buena parte de su actividad.

El primer cargo técnico de la Casa de Contratación fue el de piloto mayor, creado por Fernando el Católico en 1508. Sus cometidos consistían, de acuerdo con el clásico libro de Veitia de Linage, en "examinar y graduar los pilotos y censurar las cartas e instrumentos necesarios para la navegación". Hay que subrayar que, entre otras cosas, ello supuso la reglamentación del título de piloto como técnico en el arte de navegar, al menos en relación con los viajes a América y los demás nuevos territorios:

"Por cuanto a nuestra noticia es venido e por experiencia habemos visto que, por no ser Pilotos tan expertos como sería menester, ni tan estrutos en lo que deben saber que les baste para regir y gobernar los navíos que naveguen en los viajes que se hacen por el Mar Océano a las nuestras islas e tierra firme que tenemos en la parte de las Indias, e por defecto dellos e de no saber como se han de regir e gobernar e de no tener fundamento para saber tomar por el cuadrante e estrolabio el altura, ni saber la cuenta dello, les han acaecido, muchos yerros, e las gentes que debajo de su gobernación navegan han pasado muchos peligros, de que Nuestro Señor ha sido deservido, e en nuestra hacienda, e de los mercaderes que hallan contrata se ha recibido mucho daño e pérdida, e por remediar lo susodicho e porque es necesario que así para la dicha navegación, como para otras navegaciones que con ayuda de Nuestro Señor esperamos mandar facer para descobrir otras tierras, es necesario que haya personas más expertas e mejor fundadas e que sepan las cosas necesarias para las tales navegaciones, e los que debajo dellos fueren puedan ir más seguramente, en nuestra merced e voluntad, e mandamos que todos los Pilotos de nuestros reinos e señoríos que agora son o serán de aquí adelante, que quisieren ir por Pilotos en la dicha navegación de las dichas islas e tierra firme, que tenemos a la parte de las Indias e a otras partes en el Mar Océano, sean instruídos y sepan lo que es necesario de saber en el cuadradante e estrolabio, para que junta la plática con la teórica se puedan aprovechar dello en los dichos viajes que hicieren en las dichas partes, e que sin lo saber, no puedan ir en los dichos navíos por Pilotos, ni en ganar soldadas por pilotaje, ni los mercaderes se puedan concertar con ellos para que sean Pilotos, ni los maestres los puedan recibir en los navíos sin que primero sean examinados...

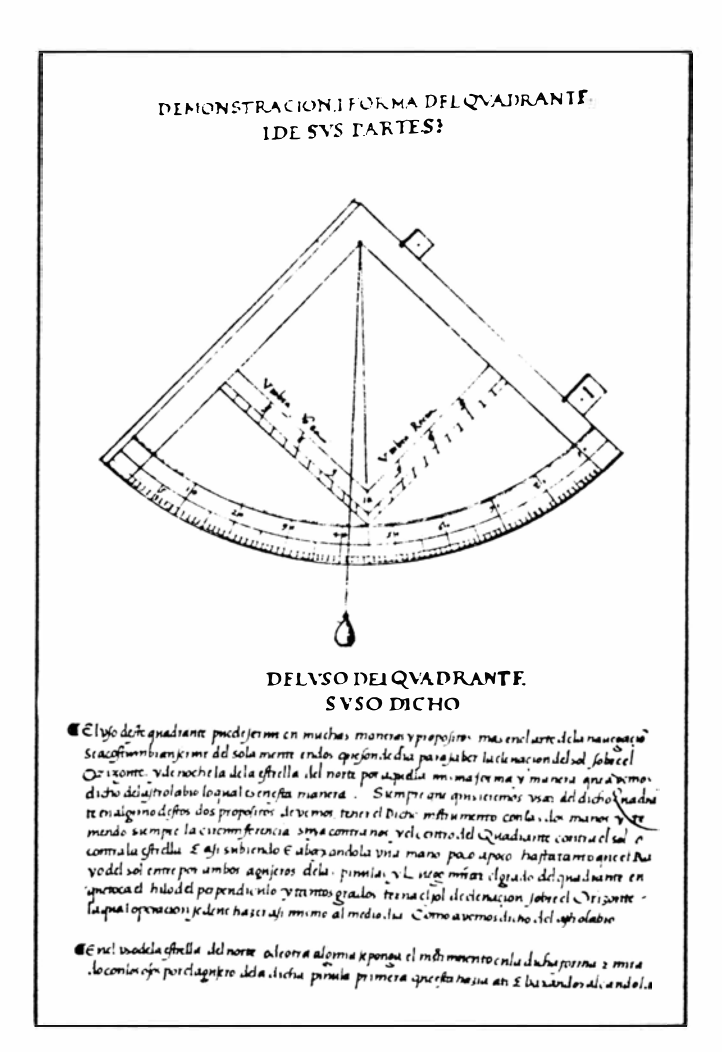
"Y porque a los que no supieren, más fácilmente lo puedan aprender de vos, mandamos que le enseñeis en vuestra casa, en Sevilla, a todos los que quisieren saber, pagándovos vuestro trabajo".

El desarrollo de las actividades de la institución hizo imposible que las tareas de tipo técnico fueran realizadas por una sola persona. En 1523 se fundó el puesto de cosmógrafo mayor, como máximo responsable de las cuestiones relativas a las cartas e instrumentos de marear. Aparte del que llevaba este cargo –cuyo perfil fue precisándose a lo largo de la centuria–, trabajaban en la Casa de Contratación otros cosmógrafos, que percibían salario y estaban autorizados a hacer las cartas e instrumentos que necesitaban los pilotos. Por otra parte, en 1552 se reorganizó la enseñanza y se creó la cátedra de Navegación y Cosmografía:

"Oficiales del Emperador Rey mi señor, que residís en la ciudad de Sevilla

DEMONSTRACION DEL DICHO ASTROLABIO

DEL VSO DEL ASTROLABIO SVSO DICHO



1. Astrolabio náutico y cuadrante, según la obra Quatri Partitu, *de Alonso de Chaves*

en la Casa de la Contratación de las Indias, sabed que nos somos informados que, a causa de no ser enseñados y tener la habilidad que se requiere en las cosas de la navegación los maestros y pilotos de naos que navegan para las Indias, se siguen muchos inconvenientes, porque a causa por falta de no ser diestros el piloto o el maestre perderse el navío que llevan a cargo y perescer mucha gente, y que para poder ser enseñados los pilotos e mestres sería cosa conveniente que hobiese en esa Casa cátedra en que se leyese el arte de la navegación y parte de la cosmografía, y que a los pilotos y maestros que hobiesen de navegar no se les diese título ni fuesen examinados sin que hobiesen oído un año o la mayor parte dél la dicha ciencia, porque con ésto cobrarían habilidad y se seguirían otros buenos efectos... habemos acordado que en esa Casa haya la dicha cátedra y que la sirva el bachiller Gerónimo de Chaves que según tenemos relación es persona hábil y suficiente y el que conviene para ello, y que haya de leer la dicha cátedra de la navegación y parte de la cosmografía y enseñar la dicha ciencia a los que la quisieren desprender conque no sean extranjeros sino naturales destos reinos de la Corona de Castilla o Aragón...".

En el mismo documento fundacional, se detalla el contenido de la enseñanza que debía impartir el catedrático de Navegación y Cosmografía:

1) Nociones elementales de "esfera" (celeste y terráquea), es decir, de astronomía y geografía.

2) Técnica de determinación de la latitud, midiendo la altura del Sol y de las estrellas cercanas a los polos celestes.

3) Fundamentos doctrinales, estructura y manejo de la brújula y de los tres principales instrumentos de observación astronómica empleados en la navegación: el astrolabio, el cuadrante y la ballestilla.

4) Problemas planteados por las brújulas y la declinación magnética.

5) Uso de los relojes para determinar la hora local.

6) Cuestiones relacionadas con la luna y las mareas.

Veamos su exposición en el documento citado:

"Y lo que el dicho bachiller Gerónimo de Chaves ha de leer en la dicha Cátedra, entre tanto que otra cosa se le manda, es lo siguiente:

"Primeramente ha de leer la esfera o a lo menos los dos libros della primero y segundo.

"Ha de leer así mismo el regimiento que trata del altura del sol y cómo se sabrá, y la altura del polo y cómo se sabrá, y todo lo demás que paresçerá por el dicho regimiento.

"Ha de leer así mismo el uso de la carta y cómo se tiene de echar punto en ella y saber siempre el verdadero lugar en que está.

"Ha de leer también el uso de los instrumentos y la fábrica dellos, porque conozca en viendo un instrumento si tiene error.

"Los instrumentos son los siguientes:
aguja de marear
astrolabio
cuadrante
ballestilla.

"De cada uno destos ha de saber la teoría, esto es, la fábrica y uso dellos.

"Ha de leer así mismo cómo se han de marear las agujas, para que sepan en cualquier lugar que estuvieren cuánto es lo que el aguja nordestea o noroestea en el tal lugar, porque ésta es una de las cosas más importantes que han menester saber por las ecuaciones y resguardos que han de dar cuando navegan.

"Ha de leer así mismo el uso de un reloj general diurno y nocturno porque les será más importante en todo el discurso de la navegación.

"Ha de leer así mismo para que sepan de memoria e por escrito en cualquier día de todo el año cuánto son de luna, para saber cuánto y a qué hora les será la marea para entrar en los ríos y barras, y otras cosas a ese mismo tono que tocan a la práctica y uso."

Para entender el fundamento y las aplicaciones de los relojes "diurnos" y "nocturnos" a los que alude el texto, conviene recordar algunas nociones elementales referentes a la hora.

Como es sabido, un *día solar verdadero* es el tiempo comprendido entre dos pasos sucesivos del Sol por el meridiano de un lugar concreto. Debido a que el movimiento aparente del Sol es irregular, la duración de este día no es constante y no puede tomarse como unidad de tiempo. En su lugar, se utiliza el *día solar medio*, definido como la duración que transcurre entre dos pasos consecutivos de un ficticio *Sol medio*, de movimiento uniforme, por el meridiano del lugar en cuestión. El *mediodía verdadero* –instante en el que pasa el Sol por el meridiano local– solamente coincide con el *mediodía medio* en algunos días del año, mientras que en el resto se adelanta o se atrasa. Se llama *ecuación del tiempo* a la curva de dichos atrasos o adelantos a lo largo del año.

No hace falta decir que la hora es la veinticuatroava parte del día, subdividida a su vez en minutos y segundos. Cada lugar tiene una *hora local verdadera* determinada por el paso del Sol por el meridiano propio, que es la que señalan los relojes de sol. Esta hora, variable de una ciudad a otra, ofrece una serie de desventajas para la vida actual que no necesitan comentarios. Por ello ha sido sustituida para las actividades ordinarias por una convención: la llamada *hora legal*. Se basa en la divisón de la esfera terrestre en veinticuatro *husos horarios*, cada uno de 15 grados de abertura. De acuerdo con su posición geográfica, cada país está sujeto a un huso, salvo los de territorio muy extenso, como los Estados Unidos o la Unión Soviética, que lo están a varios. La hora legal se obtiene añadiendo a la del meridiano adoptado como origen –el de Greenwich– el número de horas correspondiente al número del huso horario en el que está ubicado el país o territorio (por ejemplo: 2 en la Europa oriental o 21 en Argentina).

Todavía hay una nueva convención –la llamada *hora oficial*– que es la adoptada con criterio unitario por un país para todo su territorio o una parte determinada de él. Suele coincidir con la hora legal propia del huso horario donde está situada la capital del país, aunque a veces se adopta la de un huso vecino para facilitar las relaciones internacionales. Este es el caso de España, cuando adopta el horario de la Europa central (huso 1), en lugar del correspondiente al huso 0, en el que está situada.

Los relojes "diurno" y "nocturno" citados en la disposición de 1552 que creó la cátedra de Navegación y Cosmografía, indicaban, por supuesto, la hora local verdadera.

El "reloj diurno" era un reloj de sol, generalmente de tamaño pequeño para poderlo llevar en un bolsillo, y provisto de una brújula para orientar su línea central en el sentido del meridiano. Como los relojes normales de sol se construían para una determinada latitud, a medida que la nave se apartaba de ella sus indicaciones eran cada vez más erróneas. Para solucionar este problema, se idearon los llamados relojes "universales" o "generales", aplicables en todas las latitudes. El inventado por el tratadista de náutica Martín Cortés tenía, por ejemplo, un disco de horas



2. Rosa de los vientos, en el interior del "mortero", según Rodrigo Zamorano (1581). El mortero era "una caja de madera de hechura de una grande escudilla, que se cierra con un vidrio claro y redondo, tapando las junturas con cera, para que a la rosa no le entre el aire que la perturbe". Las esferas "interior y exterior" que eran de latón y la "caja cuadrada" estaban dispuestas de tal forma que "aunque esta caja de fuera se trastorne con el movimiento de la nao a una y otra parte, siempre la sobrehaz y vidrio del mortero ande a nivel con el horizonte"

movible para que en cualquier latitud su plano estuviera paralelo al del ecuador. La limitación fundamental de todos estos relojes era, por supuesto, que únicamente se podían utilizar cuando lucía el Sol.

El "reloj nocturno" o "nocturlabio" estaba basado en la observación de un fenómeno astronómico: la circunferencia que en torno a la estrella Polar describen sus "guardas", especialmente la estrella Beta de la Osa Menor o Cochab, moviéndose en el sentido contrario de las agujas de un reloj mecánico. Las reglas que utilizaban los navegantes españoles del siglo XVI se limitaban a saber que era medianoche, a finales de abril, cuando Cochab estaba exactamente al norte de la Polar; a mediados de mayo, cuando estaba quince grados más abajo; a finales de mayo, cuando estaba treinta y así sucesivamente. Los "nocturlabios" constaban de tres piezas de madera de medio centímetro de espesor. La más grande era un disco en cuya periferia estaba grabada la división del año en meses y días; tenía un mango para asirlo por su parte inferior y un "dientecico" o índice en la superior que, cuando se manejaba el instrumento, debía estar dirigido al cenit; en el centro del disco había un agujero circular. Las otras dos piezas giraban sobre este mismo centro. La segunda era otro disco de diámetro inferior, con la división del día en horas grabada en su borde y un índice que había que colocar en el disco mayor sobre la fecha en la que se usaba el aparato. La tercera pieza era una regleta giratoria, que se movía hasta que su borde pasaba por la estrella Beta de la Osa Menor; estando observando simultáneamente la Polar a través del agujero central, dicho borde señalaba la hora en el disco menor. Había otros nocturlabios diseñados para otras "guardas" de la Polar y también algunos muchos más complicados. Para el hemisferio meridional, se crearon reglas parecidas basadas en el giro de la Cruz del Sur.

Como reloj diurno y nocturno se podía utilizar el astrolabio, que en su lámina o disco llevaba grabadas curvas que permitían calcular la hora, determinando la altura del Sol durante el día o la de una estrella si era de noche. Hay que advertir, sin embargo, que estos dispositivos, propios de los astrolabios "astronómicos", no existían en los astrolabios "náuticos" o simplificados que habitualmente llevaban los pilotos.

Por otra parte, en los barcos de la época, no se contaba para medir el tiempo con los relojes mecánicos a los que hoy estamos acostumbrados, sino tan sólo con los de arena o "ampolletas". Estaban fabricados con arena fina o con polvo de mármol negro molido y secado al fuego. Generalmente eran de media hora cada pasada, es decir, de una hora la doble, aunque había también de cuatro horas y llegaron a construirse hasta de veinticuatro. Solían estar en la bitácora, encargándose de volverlas, con turnos de guardia repartidos a lo largo de toda la jornada, unos "pajes" que cuidaban también de la luz de la "lantía". Una grave causa de error era el atraso de dichos pajes, por descuido, o su adelanto, para acabar antes la guardia. También sucedía que la arena fluía más lenta con el tiempo húmedo, o excesivamente rápida con el seco o en las ampolletas muy usadas. Por todo ello, los relojes de arena no pudieron en absoluto emplearse para el transporte horario y conocer con una mínima precisión la hora del primer meridiano.

Durante el primer tercio del siglo XVII, cuando la Casa de Contratación había iniciado ya su decadencia, se dotaron otros dos puestos: el de piloto mayor arqueador y medidor de naos y el de catedrático de Artillería, Fortificaciones y Escuadrones.

Entre las personas que ocuparon estos puestos durante el siglo XVI hubo un elevado número de figuras científicas o técnicas destacadas. El oficio de piloto mayor lo ocuparon, sucesivamente, Americo Vespucio, Juan Díaz de Solís, Sebastián Caboto, Alonso de Chaves, Rodrigo Zamorano y Andrés García de Céspedes. Fueron cosmógrafos mayores o catedráticos de Navegación científicos de tanto relieve como Diego Ribero, Alonso de Santa Cruz y Jerónimo de Chaves. Incluso entre los meros cosmógrafos "con salario" encontramos a Pedro Mexía y a los tratadistas de náutica Francisco Falero y Pedro de Medina.

Hasta 1552, la enseñanza estuvo a cargo del piloto mayor, que daba las clases en su domicilio sin demasiadas formalidades. Al crearse la cátedra de Navegación, pasó a impartirse en los locales de la propia Casa y fue sometida a una detallada reglamentación. Las explicaciones debían incluir "junta la plática con la teórica". Comenzaban con la "parte de la cosmografía" que servía de fundamento teórico del arte de navegar, desarrollando después en detalle los aspectos técnicos. Como acabamos de ver, exponían en primer lugar la forma de obtener la latitud mediante la altura del Sol o de la Polar y los cálculos de sus "regimientos"; en segundo término, el uso de la carta de marear y la manera "de echar el punto en ella"; en tercer lugar, "el uso y la fábrica" de los instrumentos; por último, cuestiones tocantes al cálculo de la hora local y al calendario de mareas. La clase era diaria y de una o varias horas. La duración del curso, fijada al principio en un año, fue reducida muy pronto a un trimestre, argumentando que los alumnos "son hombres pobres e no se pueden sustentar si no es de su trabajo sirviendo en las naos, e no pueden detenerse ni estar en Sevilla más tiempo... e para aprender de lo teórico, juntamente con la experiencia y platica que ya tienen de la navegación... les bastan muy bien los dichos tres meses de tiempo continuados".

Tras acreditar haber asistido a las lecciones, los candidatos sufrían un examen ante un tribunal presidido por el piloto mayor y del que formaban parte dos cosmógrafos de la Casa y un mínimo de seis pilotos de la ciudad previamente aprobados. Este tribunal revisaba también las cartas e instrumentos que debía presentar cada candidato.

Para organizar la cartografía marítima, se creó en 1512 un padrón real o arquetipo que se conservaba en la Casa. Era renovado continuamente, ampliándose o corrigiéndose de acuerdo con las novedades aportadas por los pilotos, que debían llevar un diario detallado de su navegación. Las rectificaciones eran discutidas en juntas que los cosmógrafos celebraban una o dos veces por semana, tras someter a crítica el contenido de los diarios y de los mapas y planos procedentes de los viajes.

Como generalmente salían dos flotas al año, era posible de esta forma que estuvieran al día las cartas de marear que utilizaban los pilotos, obligados a tener al menos una. Dichas cartas eran confeccionadas por los maestros residentes en Sevilla y tenían que recibir la aprobación por parte de la Casa de Contratación.

Solamente los cosmógrafos autorizados podían fabricar las agujas de marear, astrolabios, cuadrantes y ballestillas que los pilotos estaban igualmente obligados a tener. Ya hemos dicho que no construían materialmente los instrumentos, sino que los diseñaban y dirigían el trabajo de "oficiales" más o menos especializados que fabricaban las piezas conforme a sus indicaciones.

Fuerzas nucleares estratégicas de Gran Bretaña y Francia

Aunque hasta ahora no han estado sujetas a ningún tratado de limitación de armamento firmado por las dos superpotencias, podría convenir a la paz mundial que participaran en la mesa de negociaciones

John Prados, Joel S. Wit y Michael J. Zagurek, Jr.

Cuando se habla de armas nucleares, generalmente se sobreentiende que se trata de los arsenales norteamericanos o soviéticos. Los inventarios de estos dos países representan el 97 por ciento de las cabezas nucleares del mundo; Gran Bretaña y Francia poseen la mayor parte de las restantes. A pesar de las modestas pretensiones que pueden abrigar a este respecto las dos naciones europeas, ello les otorga una imponente capacidad militar que la Unión Soviética, y en menor medida los Estados Unidos, no pueden ignorar. En realidad, las recientes propuestas planteadas por ambas superpotencias con el fin de desmantelar todos sus misiles de alcance medio desplegados en Europa difieren en muchos puntos, pero plantean una misma cuestión de fondo: ¿qué papel tendrán, en el futuro equilibrio militar de Europa, las "otras" fuerzas nucleares?

Las propuestas norteamericanas excluyen la presencia de un tercer bando en los límites que puedan negociarse en Ginebra. Los soviéticos, sin embargo, insisten en que, para que la "opción cero" sea viable, las fuerzas británicas y francesas deben congelarse en sus niveles actuales. Las exigencias rusas pretenden abortar la expansión y modernización de las fuerzas nucleares que ambos estados se proponen. De llevarse a cabo estos programas de modernización de las fuerzas armadas, el conjunto anglofrancés supondría un porcentaje significativo de las fuerzas estratégicas soviéticas, en particular si el arsenal ruso se redujera como consecuencia de un acuerdo de control de armamento. Si el control de armamento nuclear progresa, las fuerzas estratégicas europeas pronto deberían incluirse en su ámbito de aplicación.

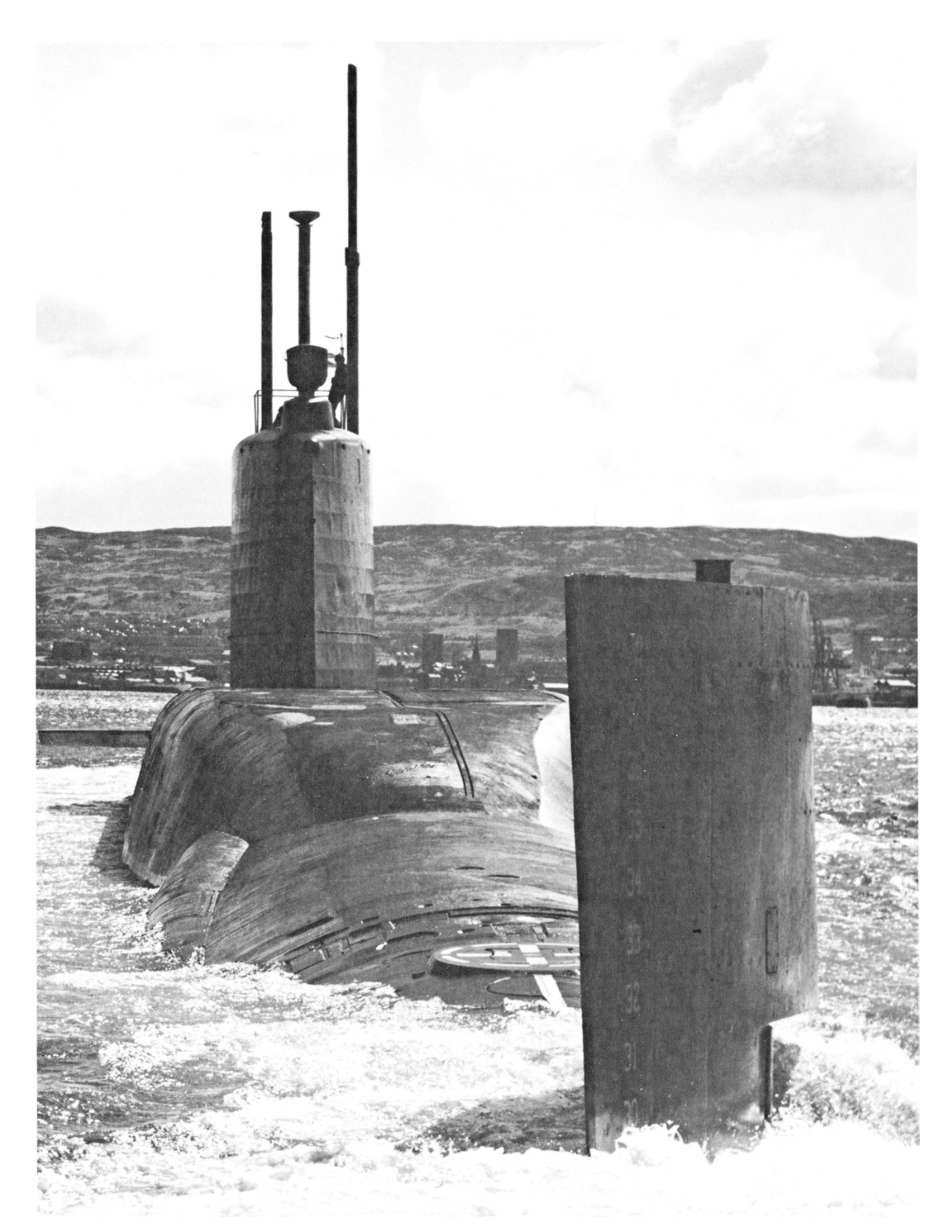
No obstante, los europeos son poco proclives a colocar sus fuerzas estratégicas en la mesa de negociaciones junto a las soviéticas y estadounidenses, a menos que las superpotencias impongan severas limitaciones en sus propios programas de armamento estratégico y en particular en sus programas de defensa estratégica. El despliegue de tales sistemas de defensa plantea a los europeos un dilema preocupante: mientras que a corto plazo el sistema soviético contra misiles balísticos (ABM) tendría una incidencia militar marginal, a largo plazo una nueva y "exótica" defensa podría probablemente anular la disuasión independiente que Gran Bretaña y Francia han buscado con ahínco. Al propio tiempo, ambas naciones consideran que un sistema de defensa americano (como los que se abordan en la Iniciativa de Defensa Estratégica, IDE) que desacoplase la defensa de Europa de la propia de los Estados Unidos, incrementaría la necesidad de tal disuasión independiente.

El temor de que, a la hora de la verdad, los EE.UU. no comprometan sus fuerzas nucleares en defensa de Europa ha constituido el motivo del desarrollo de los programas europeos de armas nucleares. Gran Bretaña, sin embargo, ha llegado a un compromiso entre la necesidad de poseer una fuerza nuclear independiente y la vinculación con los EE.UU. A cambio de mantener una mínima apariencia de subordinación a los planes de guerra nuclear impulsados por los EE.UU., junto con el resto de aliados de la Organización del Tratado del Atlántico Norte, ha recibido una valiosa (y secreta) ayuda técnica. De hecho, desde 1958 hasta 1982 cada cabeza nuclear desplegada por las fuerzas armadas británicas era o bien una copia de un arma norteamericana o bien un ingenio diseñado y construido en los EE.UU.

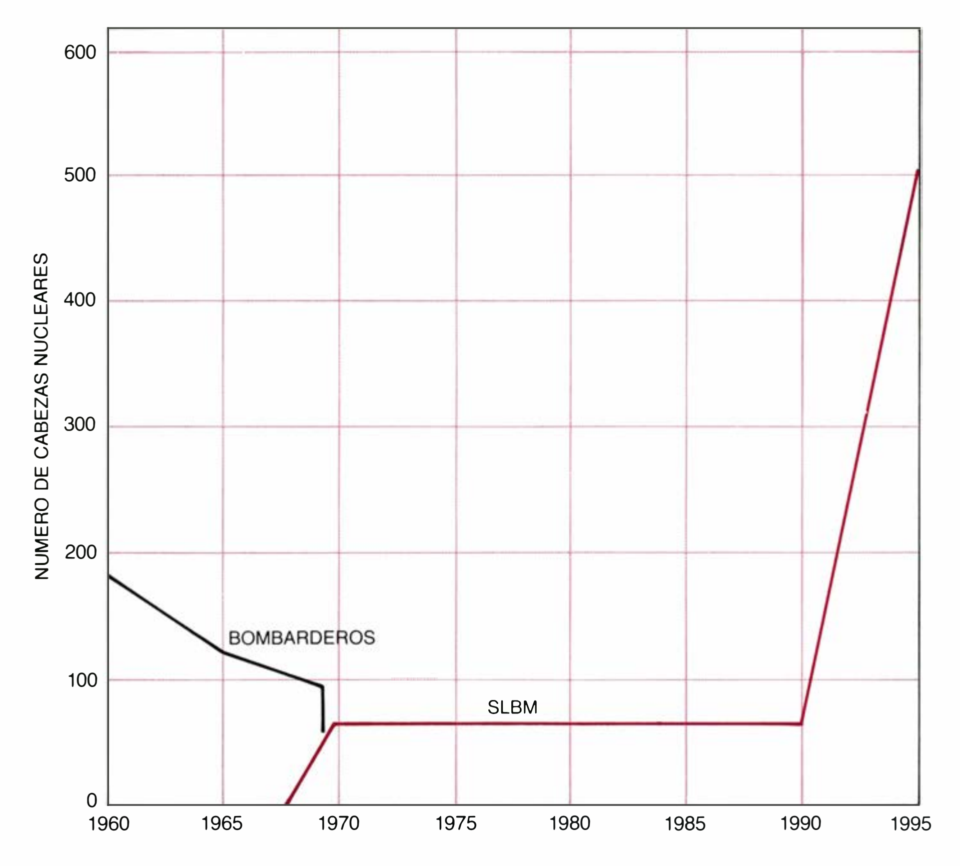
La contribución británica a su fuerza nuclear estratégica (definida como aquella fuerza nuclear que es capaz de atacar, desde sus posiciones habituales, objetivos en el territorio de la Unión Soviética) se ha limitado a la construcción de cuatro submarinos de propulsión nuclear de la clase *Resolution*. Estos viejos submarinos constituyen todavía el grueso de la fuerza estratégica británica. Cada uno es capaz de disparar 16 SLBM (misiles balísticos lanzados desde submarinos) del tipo Polaris, de fabricación americana, al que los británicos han cambiado su sistema original de dispersión de las cabezas nucleares por uno más avanzado de diseño propio denominado Chevaline. Está construido para superar las defensas ABM (en particular la defensa Galosh que protege Moscú) mediante una combinación de señuelos, virutas metálicas y vehículos maniobrables de reentrada (RV). Los SLBM equipados con el sistema Chevaline parece ser que disponen de tres a seis RV, cada uno con una cabeza nuclear de 40 kilotones (equivalentes al poder explosivo de 40.000 toneladas de TNT). No son vehículos de reentrada con capacidad de ser dirigidos contra múltiples objetivos independientes (MIRV), aunque pueden atacar blancos más dispersos en comparación con los RV de los anteriores Polaris.

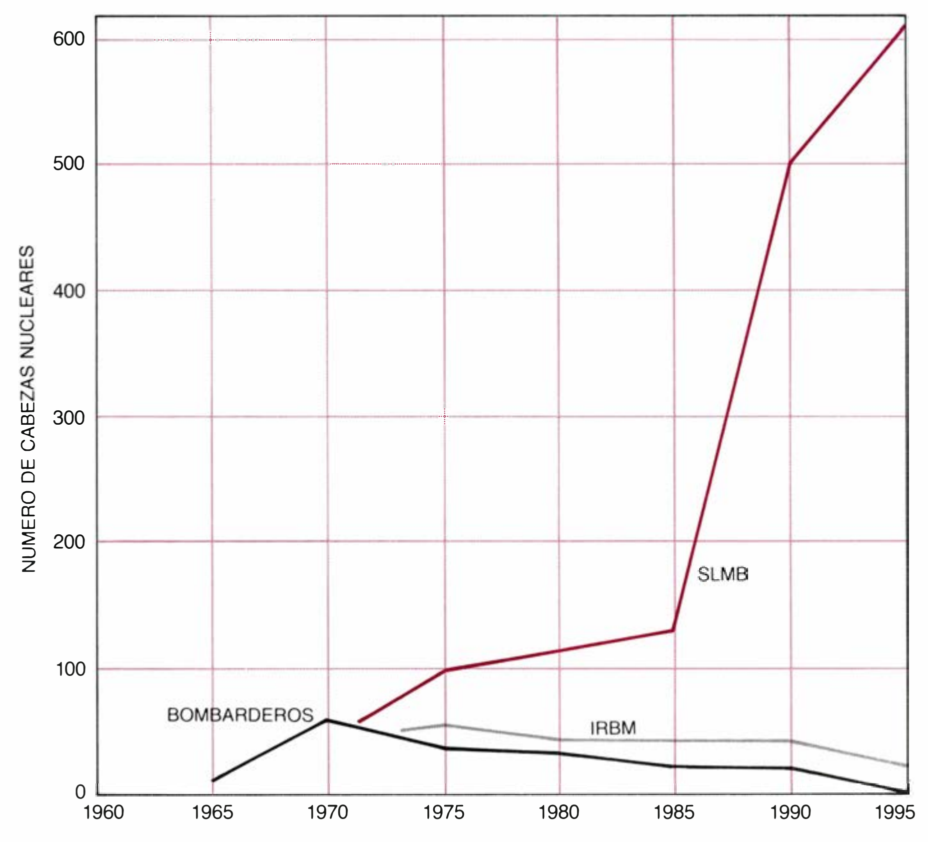
A Gran Bretaña le apremia continuar con la modernización de la disuasión mediante su flota de submarinos. A mediados de los años 90, los submarinos de la clase *Resolution* tendrán tres décadas de vida y les habrá llegado la hora de su retirada del servicio. Además, mantener operativos para entonces los misiles Polaris será difícil y costoso. (Los británicos ya se han visto obligados a sustituir, con un gran costo, los motores de combustible sólido defectuosos de los Polaris.)

En julio de 1980, el gobierno de la



1. H. M. S. *REPULSE*, uno de los cuatro submarinos de propulsión nuclear de la clase *Resolution* de la Marina Real Británica. El submarino sirve de plataforma de lanzamiento de 16 misiles balísticos Polaris, de fabricación norteamericana, dotados de cabezas nucleares británicas. Aunque sobre el papel la flota inglesa de submarinos con misiles balísticos forma parte de las fuerzas aliadas de la Organización del Tratado del Atlántico Norte, Gran Bretaña se reserva el derecho de asumir el mando unilateral de la flota si así lo aconsejan sus supremos intereses nacionales. Está previsto sustituir los submarinos de la clase *Resolution*, dentro de una década, por cuatro nuevos submarinos que transportarán los misiles norteamericanos Trident II, dotados de mayor potencia.





2. CRECIMIENTO DE LAS FUERZAS ESTRATEGICAS EUROPEAS, entendiendo por tales las que tienen capacidad suficiente para atacar el territorio soviético desde sus asentamientos habituales. Dicho desarrollo se caracteriza por un pronunciado aumento de vehículos capacitados para el disparo de cabezas nucleares. Las fuerzas británica (*arriba*) y francesa (*abajo*) estaban inicialmente formadas por bombarderos, pero desde 1975 los misiles balísticos de lanzamiento submarino (SLBM), menos vulnerables ante un ataque nuclear, dominan los arsenales estratégicos europeos. Las fuerzas francesas se distinguen por el despliegue de unos cuantos misiles balísticos de alcance medio con base en tierra (IRBM). Ambos países tienen previsto aumentar sustancialmente sus efectivos en la próxima década desplegando nuevos submarinos dotados de misiles balísticos y multiplicando el número de cabezas nucleares transportadas por cada SLBM.

primera ministra Margaret Thatcher anunció su decisión de adquirir a los EE.UU. el SLBM Trident I, e instalarlo en cuatro submarinos de nueva construcción que entrarían en servicio a mediados de los años 90. En marzo de 1982 el gabinete británico revisó su decisión, inclinándose por la compra del SLBM Trident II, de mayor poder destructivo (cuya incorporación en los submarinos estadounidenses no se prevé hasta 1989). Los nuevos submarinos ingleses irán dotados con 16 SLBM, con ocho MIRV cada uno. La fuerza británica de SLBM alcanzará entonces un total de 512 cabezas nucleares.

Si Gran Bretaña podrá o no completar su programa de modernización con los Trident (o lo que es lo mismo, si continuará en su empeño por mantener una fuerza nuclear independiente) es una cuestión abierta. En Inglaterra ha arraigado un fuerte movimiento a favor del desarme y el partido laborista, en la oposición, aboga por el abandono unilateral de la disuasión nuclear. Algunos miembros conservadores del Parlamento, al igual que otros del partido socialdemócrata, han atacado también el programa nuclear con argumentos financieros. Opinan que se emplearía mejor el dinero si se destinara a renovar las fuerzas militares convencionales británicas.

Este asunto de la modernización, aún sin resolver, continuará con toda seguridad hasta las próximas elecciones, en 1988 como muy lejos. Para entonces se habrá invertido tanto dinero en investigación, desarrollo y producción (el coste total se estima que rondará los 9000 millones de libras, unos dos billones de pesetas) que políticamente será difícil cancelar el programa Trident por completo, independientemente de qué partido gane la mayoría parlamentaria.

En contraste con su vecino del canal de la Mancha, Francia se ha mantenido firmemente apartada de los EE.UU. en lo que concierne al desarrollo de su propio programa de armamento nuclear; éste comprende aviones, misiles con base en tierra y submarinos nucleares. El principal avión de la fuerza aérea estratégica francesa es el anticuado Mirage IVA, presentado en 1964. Cuenta con unos 22 bombarderos de este tipo, con base en el nordeste del país. Con sus 3200 kilómetros de radio de acción si reponen combustible en vuelo, están capacitados para alcanzar objetivos en la Unión Soviética. Cada avión lleva una bomba nuclear de 70 kilotones. Se está

dotando a 18 de estos bombarderos con un misil nuclear aire-tierra de alcance medio para mantener su efectividad como sistema de bombardeo estratégico durante otra década.

El misil francés S-3, instalado en silos subterráneos, también puede atacar objetivos en la Unión Soviética. Cada misil lleva una sola cabeza nuclear de un megatón (equivalente a un millón de toneladas de TNT). Sólo se han desplegado 18. Dada la vulnerabilidad de estos misiles fijos con base terrestre frente a un ataque nuclear, el gobierno francés ha estudiado la posibilidad de desplegar un misil móvil de alcance medio, conocido como S-X. El despliegue de este misil está todavía pendiente, dadas las limitaciones fiscales y las dudas sobre la necesidad militar de poseer una mayor fuerza estratégica terrestre.

Al igual que los británicos, los franceses consideran su flota de submarinos con misiles balísticos como la piedra angular de sus fuerzas nucleares. Desde su comienzo en 1971, la mitad de la inversión total francesa en sistemas de armas nucleares se ha dedicado a la fuerza submarina estratégica, la Force Océanique Stratégique (FOST).

La FOST se compone de cinco submarinos de la clase *Redoutable* y uno, recientemente puesto en servicio, de la clase *Inflexible*. Los submarinos más antiguos están armados con 16 SLBM M-20 con una única cabeza nuclear. El nuevo submarino está dotado con el SLBM M-4, primer misil francés con MIRV. Puesto que cada M-4 transporta seis RV y a bordo del *Inflexible* hay 16 misiles, el número de cabezas nucleares a bordo de SLBM disponibles por Francia se dobló cuando el año pasado el submarino se incorporó a la flota. A comienzos de los 90, cinco de los seis submarinos estarán equipados con misiles M-4. En consecuencia, la fuerza naval francesa dispondrá de un total de 496 cabezas nucleares. La puesta en servicio de un séptimo submarino equipado con nuevos SLBM del tipo MIRV (llamados M-5), programada para 1994, elevará aquel total.

No es probable que los planes franceses de modernización se vean alterados por las vicisitudes de la política interior. Según parece, existe un notable consenso político en Francia en soporte del programa nuclear y, aunque inicialmente los partidos socialista y comunista se opusieron al proyecto de una fuerza nacional estratégica nuclear, a finales de los 70 se unieron a los partidos de centro y de derecha en su apoyo. De hecho, el gobierno socialista del presidente François Mitterrand

	VEHICULO	UNIDADES DESPLEGADAS	CABEZAS NUCLEARES TRANSPORT.	POTENCIA DE CADA CABEZA (KILOTONES)	AÑO DEL DESPLIEGUE
GRAN BRETAÑA	POLARIS (CHEVALINE) SLBM	64	3-6	40	1982
GRAN BRETAÑA	TRIDENT II SLBM	64	8*	475?	principios de los 90
FRANCIA	S-3 IRBM	18	1	1,000	1980
FRANCIA	M-20 SLBM	80	1	1,000	1977
FRANCIA	M-4 SLBM	16	6*	150	1985
FRANCIA	BOMBARDERO MIRAGE IVA	18	1	150	1964
FRANCIA	S-3 IRBM	18	1	1,000	1980
FRANCIA	M-20 SLBM	16	1	1,000	1977
FRANCIA	M-4 SLBM	80	6*	150	1985
FRANCIA	M-5 SLBM	16?	≥6*	?	1995
FRANCIA	S-X IRBM?	?	?	?	?

3. VEHICULOS DE TRANSPORTE NUCLEAR de los arsenales británicos y franceses: aparece en negro el contingente actual y, en color, aquellos que se supone que existirán dentro de una década. Todos los SLBM del arsenal británico se han desarrollado y construido en los EE.UU., aunque el mecanismo de dispersión de las cabezas nucleares de la versión Chevaline del misil Polaris y del Trident II son de diseño británico. El asterisco indica que las cabezas nucleares de un misil las transportan vehículos a los que puede asignarse objetivos múltiples e independientes: las cabezas nucleares de un misil pueden atacar objetivos muy alejados.

ha impulsado la modernización de la fuerza nuclear a expensas de las fuerzas francesas convencionales (lo cual se nota especialmente en el número de hombres en servicio).

Además de las dudas acerca del grado de confianza que merecen las garantías norteamericanas de empeñar sus fuerzas nucleares en defensa de Europa, portavoces de los gobiernos británico y francés justifican los programas de armamento nuclear poniendo énfasis en el valor intrínseco, tanto político como militar de tales programas. Los partidarios de un arsenal nuclear independiente, aunque modesto, argumentan que la amenaza de explosionar cabezas nucleares sobre las ciudades del enemigo es suficientemente eficaz como para detener a cualquier agresor, aunque se trate de un oponente tan formidable como la URSS. Este es el argumento subyacente de la doctrina estratégica de Gran Bretaña y Francia. Sin embargo, cada país ha asignado un cometido peculiar a sus dotaciones en armas nucleares en el caso de una guerra que, al menos teóricamente, nadie debería caer en la locura de empezar.

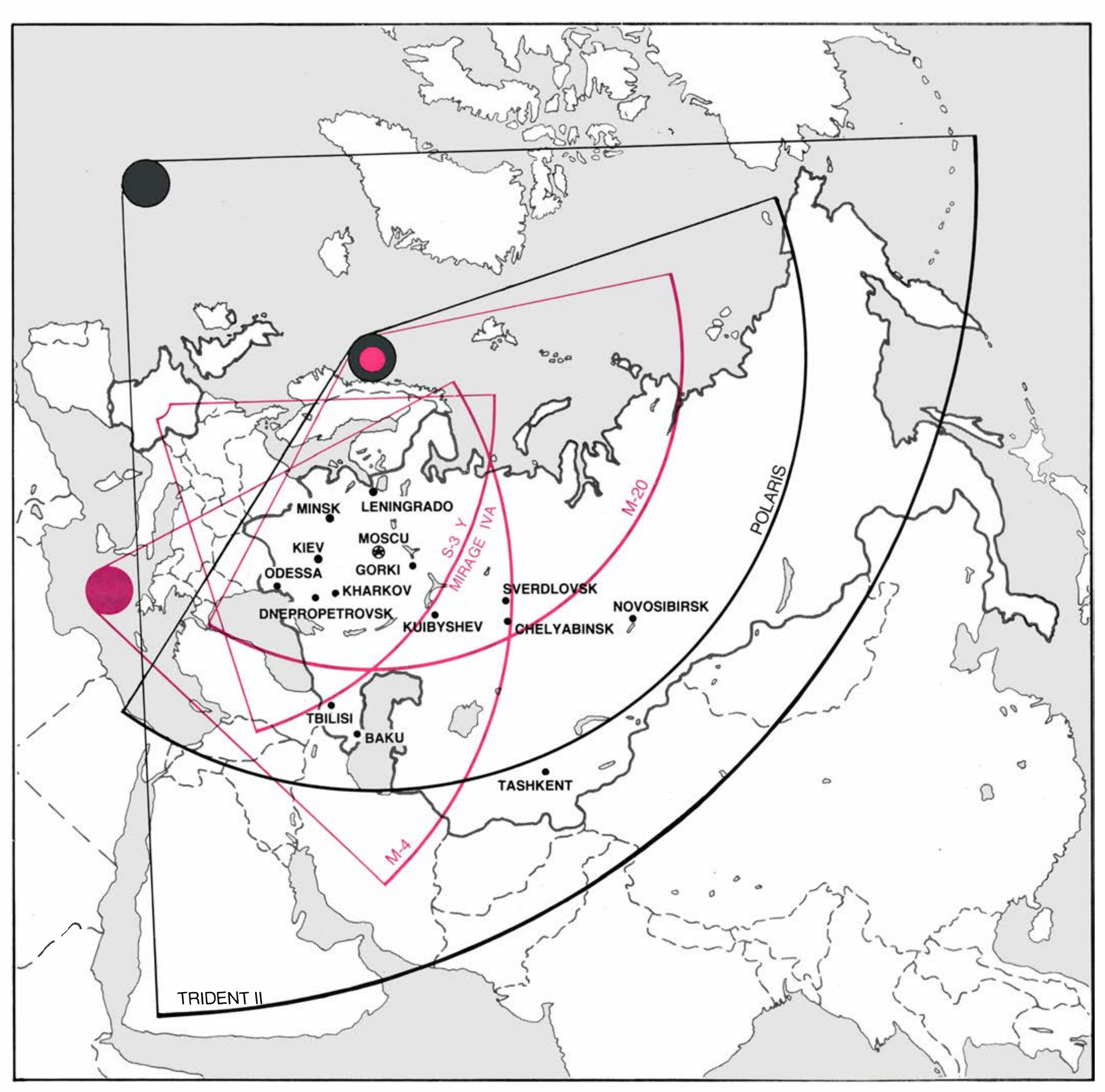
Manteniéndose en la estructura de mando de la OTAN, los potenciales objetivos a destruir por armas nucleares son asignados a Gran Bretaña por el comandante supremo aliado en Europa, que siempre ha sido un oficial norteamericano. Ante la menguada precisión del misil Polaris, la lista de los objetivos que manejen los británicos abarcará instalaciones militares vulnerables: aeropuertos, depósitos de abastecimiento y campamentos de instrucción de tropas. Gran Bretaña mantiene, sin embargo, la autoridad final sobre su fuerza estratégica naval y se reserva el derecho de emplearla como "garantía última de su seguridad nacional". Con este fin, en Whitehall hay otras listas distintas de objetivos. De acuerdo con la idea de que el miedo a la aniquilación de buena parte del país constituye la mejor disuasión, los blancos de las listas inglesas serán, presumiblemente, centros urbanos e industriales soviéticos clave, en vez de instalaciones militares.

El arsenal nuclear del ejército francés es algo más variado que el británico. Ello explica que Francia haya optado por una doctrina diferente en la asignación de objetivos. La estrategia francesa hace hincapié en la "neutralización de las estructuras administrativa, económica y social del adversario", y ocasionaría un gran número de víctimas. Además, Francia rechaza oficialmente la inclusión de cualquiera de sus fuerzas nucleares en los planes de guerra de la OTAN, aunque persisten los rumores de que al menos han tenido lugar consultas informales entre Francia y sus aliados para coordinar las fuerzas en caso de guerra.

Supongamos que Gran Bretaña y Francia siguen manteniendo la doctrina que asigna los RV o bombas nucleares disponibles a los principales centros industriales y urbanos soviéticos. ¿Cómo incidiría el programa de modernización

de cada país en la misión de sus fuerzas estratégicas? Dado que la eficacia de la disuasión nuclear emprendida por británicos y franceses radica en la amenaza "creíble" de la destrucción masiva, hemos construido un modelo de ordenador que evalúa los niveles de daños en los centros industriales y urbanos que las fuerzas anglofrancesas podrían infligir a la Unión Soviética.

Según nuestros resultados, la fuerza estratégica francesa podía haber causado, en 1985, entre 23 y 34 millones de muertes y destruido entre el 16 y el 25 por ciento de la capacidad productiva soviética (es decir, instalaciones industriales, altos hornos, refinerías y plantas químicas). A final de 1990 estas cifras se habrán incrementado significativamente. El número de muertes potenciales oscilaría entre los 38 y 55 millones y podría destruirse entre el 25 y el 40 por ciento de la capacidad de producción soviética. Los daños resultarían más cuantiosos aún en 1995, cuando el séptimo submarino francés equipado con misiles balísticos entre en servicio, ascendiendo a 81 millones las bajas soviéticas, a la vez que hasta dos terceras partes de la capacidad de pro-



4. RANGO DE ACCION APROXIMADO de los misiles y aviones británicos (*negro*) y franceses (*color*). Ese alcance determina qué ciudades de la URSS y con qué vehículos pueden ser batidas. Las áreas presumibles de lanzamiento de los SLBM se muestran en círculos. Se ha usado esta información para calcular las pérdidas en vidas y en capacidad de producción que un hipotético ataque nuclear europeo causaría en la URSS (*véanse las figuras 6 y 7*). A cada ciudad ubicada en el alcance de un vehículo determinado se le ha asignado una cabeza nuclear del tipo característico transportado por aquél; la distribución de las cabezas nucleares sobrantes tras la asignación inicial se ha hecho corresponder con el tamaño de cada ciudad. Se ha supuesto que las cabezas nucleares detonarían a alturas que maximizaran los daños de la explosión. Se ha considerado como unidad de medida el área sometida, como consecuencia del bombardeo, a sobrepresiones iguales o superiores a unas 0,4 atmósferas: toda la población que se halle dentro del área moriría y se destruirían todos los edificios. Se ha supuesto que una ciudad estaba "saturada" cuando toda la zona urbana se hallaba sometida a la sobrepresión letal. Se ha supuesto, asimismo, que un sistema de misiles antibalísticos (ABM) que protege una ciudad objetivo podría contrarrestarse asignando, en el ataque contra esa ciudad, más cabezas nucleares.

ducción podrían ser anuladas por un ataque nuclear.

La capacidad de las fuerzas estratégicas británicas para infligir daños a la Unión Soviética también se incrementará en la próxima década, aunque no al mismo ritmo que la francesa. Aplicando a la fuerza de Gran Bretaña el mismo análisis que el realizado con la francesa (y suponiendo que todos los SLBM transporten un sistema Chevaline con seis cabezas nucleares), estimamos que las víctimas potenciales de un ataque nuclear británico oscilarían entre los seis y los 21 millones de muertos y se destruiría entre un 5 y un 15 por ciento de la producción básica. Aunque hasta 1990 no habrá cambios en la composición de las fuerzas británicas, los niveles de pérdidas ocasionadas disminuirán ligeramente hasta entonces debido a las mejoras introducidas en el sistema de defensa ABM de Moscú. Suponiendo que cada SLBM Polaris transporte sólo tres RV, los daños serían muy inferiores: de tres a ocho millones de bajas y aproximadamente el 5 por ciento de la producción.

Sin embargo, con la introducción del SLBM Trident II en su fuerza nuclear en los años 90, Gran Bretaña estará capacitada para causar entre 24 y 68 millones de víctimas soviéticas y destruir hasta la mitad de la producción soviética básica. Ante el número arrollador de cabezas nucleares de la proyectada fuerza Trident británica, la eficacia del sistema de defensa ABM de Moscú apenas aliviaría las pérdidas globales.

Si la disuasión de un ataque soviético sobre Gran Bretaña y Francia se basa en la magnitud de la potencial destrucción, en vidas e instalaciones, que una guerra nuclear con cualquiera de ambos países produciría, la proliferación de cabezas nuclares estudiada en los programas de modernización de ambos países confiere solidez a la eficacia disuasoria de sus fuerzas estratégicas. A modo de comparación, los niveles de daño se acercan, si no exceden, a los de "destrucción asegurada" adoptados por los EE.UU. para sus fuerzas estratégicas en la década de los 60.

El mayor número de cabezas nucleares disponibles en ambas naciones les permitiría también realizar cambios en su política militar de asignación de objetivos. El Libro Blanco británico de 1980 (que equivale al Informe sobre la Situación elaborado anualmente por el Secretario de Defensa de los EE.UU.) admitió que "debido al cambio de las condiciones podría haber más formas de amenazar el poderío soviético" y que "conviene guardar cierta flexibilidad en la planificación de las eventualidades". En otras palabras, podrían asignarse a las cabezas nucleares otros objetivos distintos de las ciudades, siempre y cuando se reservara un número suficiente que asegurara la disuasión de último recurso basada en la destrucción urbana e industrial.

De acuerdo con ese criterio, los británicos reservarían para unos cuantos objetivos seleccionados por la OTAN las cabezas nucleares que excedieran a las que se consideran necesarias para mantener una disuación nuclear independiente y creíble. Esto permitiría al comandante supremo de la OTAN trazar planes de ataque alternativos con planteamientos más limitados en cuanto a la aniquilación urbana e industrial se refiere. En estos planes, los SLBM británicos podrían dirigirse contra el mismo tipo de objetivos del teatro de operaciones europeo que actualmente cubren los Pershing II norteamericanos: cuarteles de mando y control, bases y centros de almacenamiento.

Para Francia, la opción por objetivos limitados resulta más difícil. Muchos observadores galos han manifestado que el incremento del número de cabezas nucleares robustecería la capacidad disuasoria, al cubrir un amplio abanico de instalaciones militares, además de los centros urbanos e industriales. Argumentan que, tal como están las cosas, el gobierno francés no tiene otra opción que la amenaza de una destrucción masiva del bando soviético –un recurso que con toda seguridad sometería a Francia a un ataque de represalia parejo. Puesto que el abandono de la disuasión supondría el suicidio nacional, estos observadores argumentan que los planes de guerra deben abarcar opciones de ataque a objetivos concretos y no quedarse en una respuesta global contra la estructura social de la URSS.

El gobierno francés ha rechazado persistentemente estos argumentos y se ha afirmado en el efecto disuasorio de una estrategia nuclear "contra-ciudades". Pero cuando la fuerza nuclear estratégica aumente, en la próxima década, es posible que el gobierno reconsidere su doctrina nuclear.

Aunque la capacidad propia de cada país por su cuenta, en lo relativo a su oposición militar a la Unión Soviética, aumente durante la próxima década, una disuasión nuclear europea conjunta basada en la cooperación anglofrancesa resultaría mucho más eficaz. La destrucción de áreas urbanas e industriales alcanza rápidamente el punto de saturación; por tanto, las principales ventajas de una fuerza conjunta anglofrancesa no derivarían de los niveles de aniquilación global, sino de la mayor flexibilidad en la elección serva de cabezas nucleares donde elegir. La fuerza conjunta mantendría también un mayor número de cabezas nucleares en reserva después de los primeros ataques, e incrementaría, dada su mayor dispersión, la contundencia de las posibles represalias que tomara Europa Occidental.

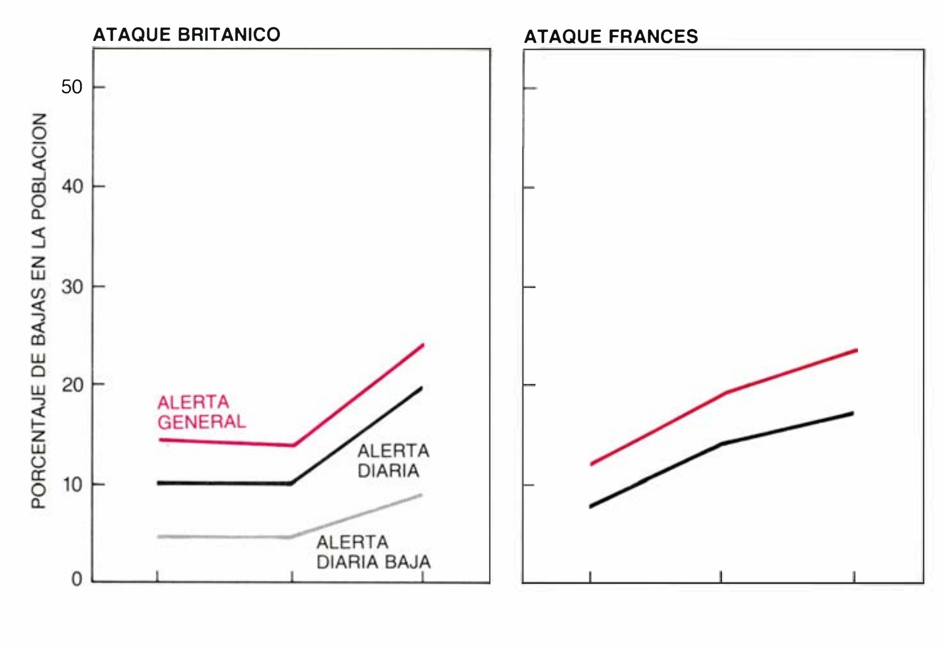
Desde la perspectiva soviética, el desarrollo de las fuerzas estratégicas europeas presenta amplias y graves implicaciones. Ciertamente, la adopción de opciones de ataque limitado por los británicos y por los franceses complicaría seriamente la planificación militar soviética, en particular la relacionada con las batallas terrestres en Europa. Sin embargo, el potencial destructivo esgrimido por las potencias nucleares europeas es lo que provocaría la peor situación hipotética en que puede verse la URSS: un ataque nuclear de una tercera potencia nuclear desarbolaría a la Unión Soviética, dejándola extremadamente vulnerable ante un ataque posterior de los EE.UU. Para prevenir tal contingencia, Rusia podría considerar el despliegue de un sistema de defensa balístico en toda la nación. Hasta aquí hemos supuesto que la URSS cuenta con un máximo de 100 rampas de lanzamiento de interceptores ABM alrededor de Moscú (autorizadas en el tratado ABM de 1972) para defenderse de un ataque nuclear estratégico. ¿Podría darse el caso de que la expansión de un sistema soviético ABM –que cubriera otras áreas urbanas e industriales de la Unión Soviética– mermara seriamente la efectividad de las fuerzas nucleares europeas?

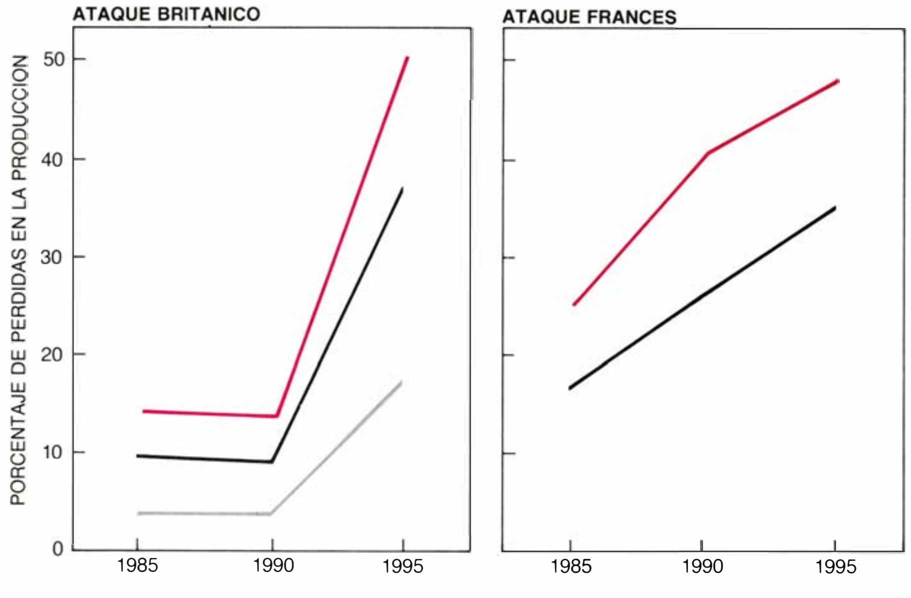
Suponiendo que los soviéticos denunciaran el tratado ABM a finales de los 80 o a comienzos de los 90 y desplegaran hasta 1000 rampas ABM en 1995, la destrucción que entonces podrían producir las fuerzas europeas en la Unión Soviética se reduciría notablemente. Ello sólo ocurriría en el caso de que el sistema de defensa soviético tuviera un alto grado de eficacia: cada interceptor ABM debería tener al menos el 60 por ciento de probabilidades de destruir un RV atacante, contando además con que hubiera un gran número de rampas de lanzamiento de tales interceptores. Un sistema defensivo menos seguro debilitaría algo la fuerza aniquiladora del arsenal nuclear europeo.

En la hipótesis de un ataque nuclear anglofrancés, el potencial destructivo

sólo mengua cuando el volumen de la defensa contra misiles soviética alcanza los 1500 interceptores desplegados. Tal defensa requeriría un programa soviético de ABM muy costoso y de gran escala. Por consiguiente, de acuerdo con nuestros cálculos, mientras no se despliegue más que un número moderado de interceptores (menos de 800) en un sistema ABM soviético actualizado, y mientras los interceptores sean de una eficacia relativa (con un porcentaje menor del 60 por ciento de rendimiento), las fuerzas nucleares francesas y británicas conservarán sus respectivos papeles disuasorios durante los años 90.

El despliegue soviético de un sistema de defensa antimisiles un tanto mayor, aunque de eficacia limitada, no alteraría quizá la estrategia europea relativa a los objetivos. Los estados mayores británicos y franceses se verían forzados a dirigir una mayor cantidad de cabezas nucleares contra un número menor de objetivos para asegurar que, al menos, algunas atravesarían las defensas protectoras de los blancos más relevantes. Probablemente este hecho favoreciera la adopción de estrategias basadas en opciones de objetivos limitados, ya que para llevar a cabo un ataque contra núcleos urbanos e industriales se requeriría agotar los silos nucleares. Asimismo, un sistema soviético de defensa contra misiles en gran escala alteraría drásticamente la política militar de Gran Bretaña y Francia: introduciría nubes de desconcierto sobre el posible daño que sus relativamente modestas fuerzas provocarían en un ataque generalizado.





5. VOLUMEN DE DESTRUCCION POSIBLE de la sociedad soviética y con el que Gran Bretaña y Francia pretenden disuadir la agresión de la URSS. Aumentará sensiblemente cuando se cumplan los programas de modernización. Las víctimas potenciales que resultarían de un ataque nuclear europeo en grandes zonas urbanas y centros industriales se dan en porcentajes de la población soviética; los complejos de producción destruidos se representan en porcentaje de la capacidad soviética de producción. Se pueden atribuir varios niveles de prevención de las fuerzas atacantes: alerta general (*color*), durante la cual casi todas las fuerzas están preparadas para un ataque; alerta diaria (*negro*), en la que se excluyen los aviones, submarinos o misiles en revisiones de rutina y, en el caso de las fuerzas británicas, la alerta diaria baja (*gris*), en la que se supone que sólo un submarino está preparado para disparar de inmediato sus misiles. Los cálculos no consideran ninguna medida soviética de defensa civil. Sólo se tiene constancia de un sistema ABM en Moscú, y a cada interceptor se le ha asignado un 30 por ciento de probabilidades de interceptar un vehículo de reentrada.

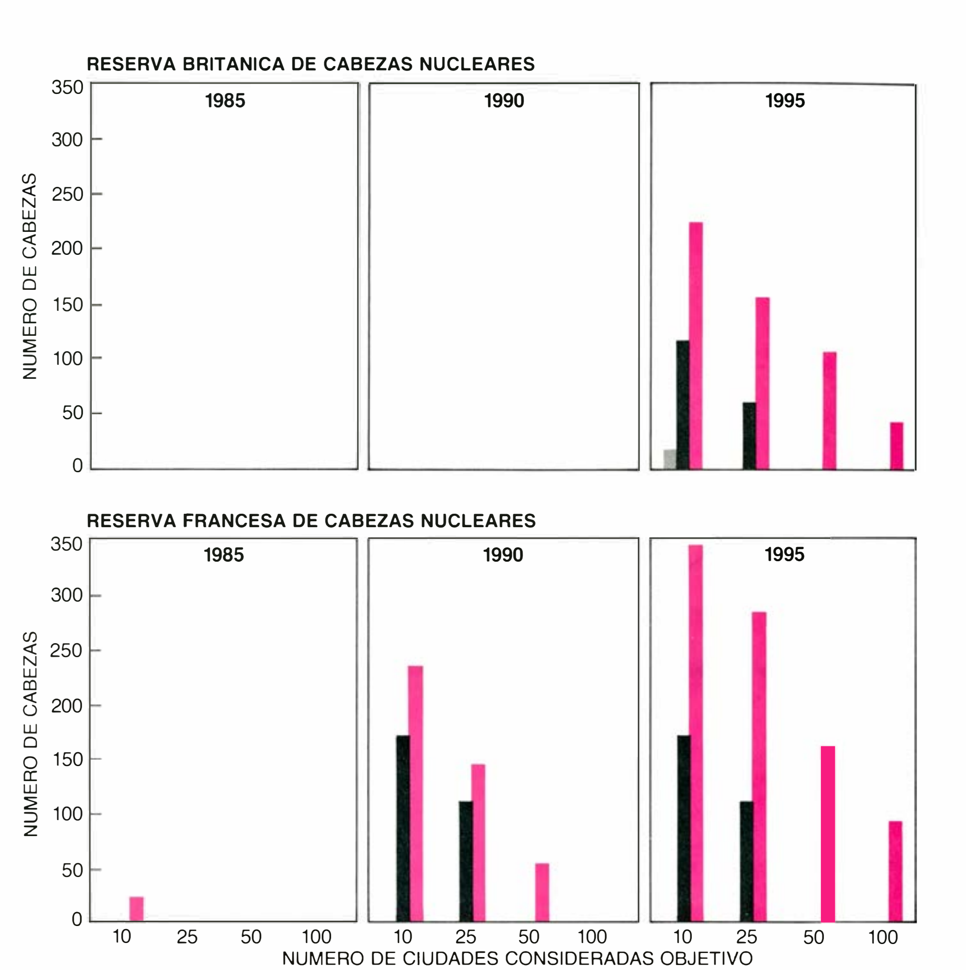
En nuestro modelo de ordenador, la eficacia atribuida a un interceptor ABM soviético constituye un factor crítico; y aceptamos que la hayamos sobreestimado en nuestros cálculos. Supuestos más reales acerca de la contundencia de un sistema ABM soviético significarían, naturalmente, que, para destruir el mismo número de RV atacantes, la URSS debería desplegar un mayor número de rampas de lanzamiento de interceptores ABM. Aún más, en los casos de crisis más probables, cuando las fuerzas se encuentran en alerta general (en la que todos los sistemas de lanzamiento nucleares están preparados y dispuestos a desencadenar un ataque) se necesitaría un elevado número de rampas ABM para que el sistema defensivo soviético pudiera constituir un factor significativo. En resumen, incluso después de una sustancial inversión, un sistema ABM reforzado quedaría lejos de interés militar contra las fuerzas europeas.

Vayamos con el supuesto más crítico quizá de nuestro modelo de ordenador. No se refiere tanto al sistema ABM en sí cuanto a la estrategia soviética de intercepción de los RV atacantes. En nuestro análisis se producían múltiples intentos de intercepción contra cada RV agresor. En otras palabras, se supuso que, si un interceptor ABM erraba el blanco, se lanzarían otros ABM contra el RV atacante, hasta destruirlo o hasta que se agotaran los interceptores.

En el supuesto de una guerra nuclear, el estado mayor soviético vería en el ataque europeo un precursor del ataque norteamericano y procuraría no agotar su potencial defensivo contra la primera fuerza, menos potente que la segunda. Si las reglas de combate imaginadas contra los RV se alteran para permitir un único intento de intercepción contra cada RV europeo, el rendimiento de la defensa contra misiles soviética descendería espectacularmente. Por ejemplo, un sistema ABM de 500 rampas que, en 1995, permita múltiples intentos de intercepción oponiéndose a un ataque en estado de alerta

marino está en posición, dispuesto a lanzar misiles) reduce las previsiones de las bajas soviéticas inmediatas a sólo 309.000. Sin embargo, el mismo ataque y el mismo sistema defensivo, pero con una única oportunidad de intercepción, eleva las perspectivas a 13 millones de víctimas.

En suma, aunque un sistema ABM soviético pudiera representar un desafío para las fuerzas nucleares europeas, la mera existencia de las fuerzas nucleares de un tercer país complica el funcionamiento de cualquier defensa soviética contra misiles balísticos. Para garantizar una defensa eficaz, el sistema ABM soviético debería adquirir el volumen y fuerza suficientes para soportar todos los ataques del tercer país y conservar la capacidad de enfrentarse con otro ataque norteamericano. Una defensa de esta magnitud constituiría una empresa extremadamente difícil y costosa. Obviamente, la URSS tratará de buscar en la mesa de negociaciones una opción más barata.



6. CABEZAS NUCLEARES DE RESERVA, entendiendo por tales las ojivas que sobran después de haber cubierto el cupo que asegure la saturación de todas las ciudades consideradas en la relación de objetivos. El número de cabezas nucleares de reserva depende de cuántas sean las principales ciudades soviéticas implicadas (10, 25, 50 o 100) y de si las fuerzas atacantes se hallan en estado de alerta general (*color*), alerta diaria (*negro*) o alerta diaria baja (*gris*). Ya en 1985, las fuerzas francesas en alerta general podrían haber tenido unas pocas cabezas nucleares sobrantes después de haber destruido las 10 mayores ciudades soviéticas. Gran Bretaña tendrá que esperar hasta 1995, cuando se hayan desplegado los SLBM Trident II, para contar con cabezas nucleares sobrantes después de efectuar un ataque nuclear generalizado contra la Unión Soviética.

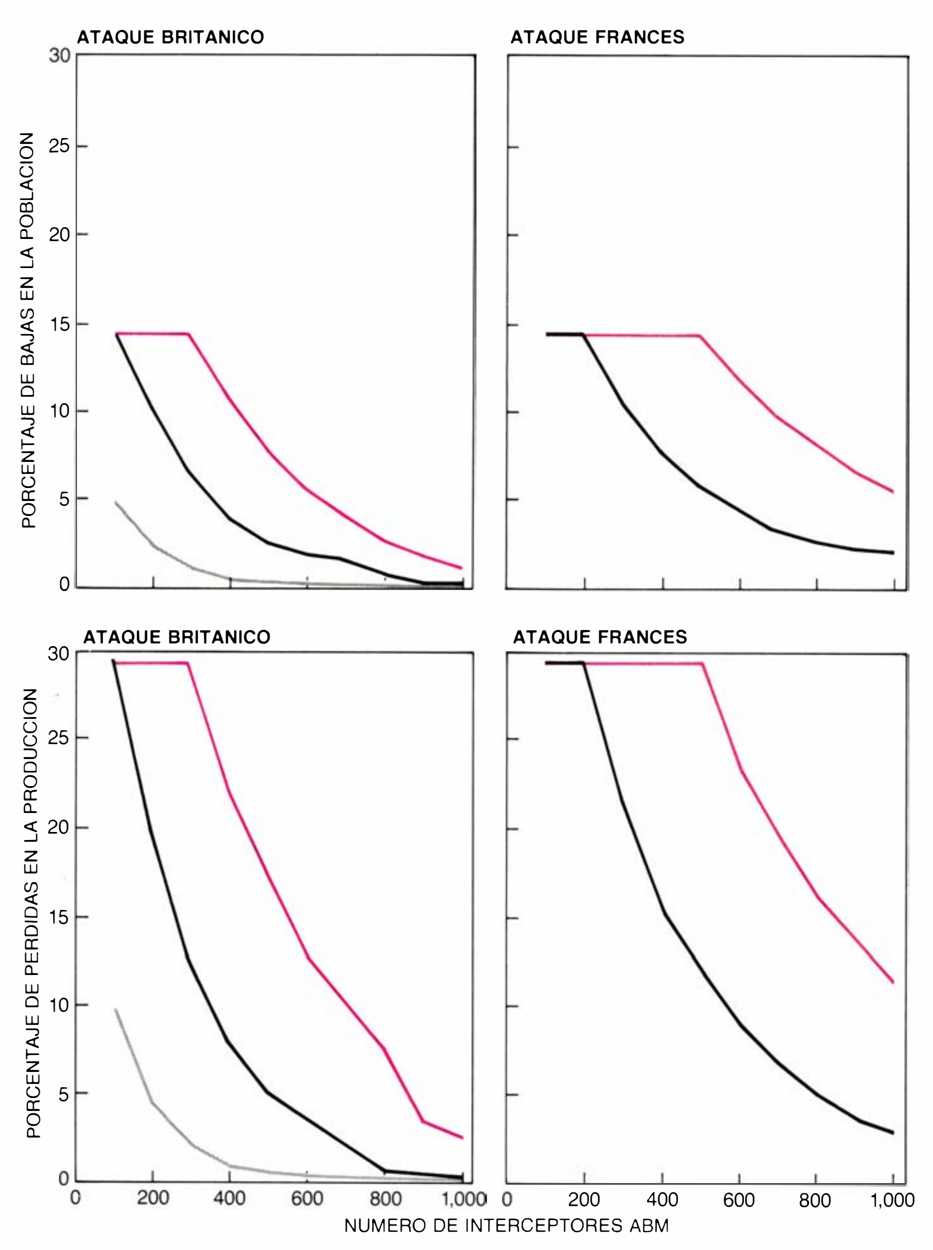
No obstante, desde finales de los años 60, Gran Bretaña, Francia y los EE.UU. cierran filas a la hora de excluir las fuerzas nucleares europeas de las negociaciones de reducción de armamento. Todos los intentos soviéticos por colocar las fuerzas británicas y francesas junto con las americanas en un platillo de la balanza y buscar el equilibrio entre las fuerzas estratégicas soviéticas y occidentales han sido rechazados por los norteamericanos, que ven en ello una legitimación de una superioridad estratégica soviética frente a los EE.UU. Incluso en conversaciones que atañen propiamente a los europeos, tales como las recientes negociaciones sobre las fuerzas nucleares de alcance medio (INF), Gran Bretaña y Francia, con el apoyo de los EE.UU., han insistido en permanecer al margen de cualquier limitación que obligara a las armas nucleares norteamericanas instaladas en Europa.

De los argumentos que han esgrimido los EE.UU., Gran Bretaña y Francia para justificar la exclusión de las fuerzas galas e inglesas de cualquier limitación de armamento, algunos no son enteramente convincentes. Por ejemplo, aducir, como opina Norteamérica, que estas fuerzas no están destinadas a impedir ataques contra otros miembros de la alianza puede ser cierto para Francia, pero no lo es para Gran Bretaña. Las armas nucleares británicas suelen considerarse parte de las fuerzas de la OTAN; y sólo en circunstancias extremas el Reino Unido asumiría el mando unilateral de su arsenal.

La tesis occidental de que las fuerzas europeas no son fuerzas del teatro de operaciones, sino estratégicas, y por tanto no deben mencionarse en el foro de unas conversaciones INF, contradice la postura mantenida anteriormente por la delegación norteamericana en las conversaciones previas sobre limitación de armas estratégicas (SALT). Finalmente, los aliados europeos han manifestado que las fuerzas europeas son irrelevantes para reputarlas como una amenaza. Si se comparan en números absolutos con todas las fuerzas estratégicas soviéticas, quizá sea ello cierto. Pero si las cotejamos con las fuerzas convencionales soviéticas en el teatro de operaciones europeo, no lo es tanto. Además, quedarse en la mera comparación numérica es eludir la cuestión: en este momento, las fuerzas europeas podrían infligir un daño sin precedentes a la Unión Soviética.

No está claro que las razones occidentales permitan a las dos potencias nucleares europeas evitar por más tiempo su inclusión en las negociaciones sobre control de armamentos. Como hemos dicho antes, de acuerdo con sus planes de modernización, las fuerzas británica y francesa combinadas representarán un porcentaje significativo de las fuerzas estratégicas soviéticas. Cualquier nuevo acuerdo bilateral de control de armas estratégicas no haría más que empeorar la posición soviética frente a Europa. Por ejemplo, un acuerdo estratégico según los modelos propuestos por los EE.UU. limitaría los efectivos estratégicos soviéticos a 7000 cabezas y bombas nucleares. En este caso, las fuerzas disponibles por Gran Bretaña y Francia en 1995, si no mediare restricción alguna, podrían constituir el 16 por ciento del total soviético.

La creciente capacidad de las fuerzas europeas de infligir daños considerables en la Unión Soviética, aparte de los problemas que presenta para los planes defensivos soviéticos, y que no mencionamos, conducirá con seguridad a una continua presión de los rusos para incluir las fuerzas británica y fran-



7. SISTEMA DE DEFENSA SOVIETICO ABM basado en tecnología del siglo XX: reduciría el nivel de pérdidas infligidas por las fuerzas europeas, pero no impediría la destrucción de las 25 principales ciudades soviéticas, si las fuerzas atacantes estuvieran en condiciones de alerta general (*color*) o diaria (*negro*), a menos que se desplegaran unos 800 interceptores ABM. Unos 300 interceptores neutralizarían un ataque nuclear británico iniciado en condiciones de alerta diaria (*gris*). Para la elaboración de estos gráficos se ha supuesto que la eficacia de cada interceptor ABM alcanza un 60 por ciento, extremo éste que probablemente exagera su rendimiento real. Un sistema de defensa contra misiles para el siglo XXI sería más eficaz y amenazaría seriamente la disuasión nuclear independiente británica y francesa. La negociación de un tratado de control de armamento con la URSS podría ser la mejor forma de prever el despliegue de un sistema ABM soviético que minara la disuasión europea, tanto en este siglo como en el próximo. (Dibujos de Ian Worpole.)

cesa en cualquier nuevo acuerdo sobre control de armamento. En beneficio de la seguridad internacional que proporcionan estos tratados, si en ello se coincide, debe encontrarse cuanto antes una solución al problema de las terceras potencias.

Por ironía de las cosas, la vieja pretensión soviética de incluir las fuerzas europeas en el proceso de control de armamento podría redundar en beneficio de los EE.UU. y de sus aliados. Aunque sin duda la modernización de las fuerzas europeas incrementaría su contribución a la disuasión de un ataque soviético, la expansión incontrolada de los arsenales europeos puede disminuir el umbral de confrontación a partir del cual Gran Bretaña y Francia dispararían sus armas nucleares. En tal caso, los EE.UU. se verían arrastrados hacia una guerra nuclear total como consecuencia de una situación de la que no serían directos responsables. Por ejemplo, la Unión Soviética podría no distinguir entre un SLBM europeo y otro americano. Consecuentemente, si una de las potencias nucleares europeas lanzara un SLBM hacia la Unión Soviética al comienzo de una crisis, la Unión Soviética podría responder con un ataque indiscriminado de represalia contra las fuerzas occidentales, incluidas las de los EE.UU.

Más aún, la pretensión de una mayor autonomía en temas nucleares por parte de Gran Bretaña y Francia arrastra un rosario de connotaciones políticas que reverberan en el núcleo de las relaciones entre EE.UU y Europa. Una defensa europea cada vez más independiente basada en la amenaza del uso de armas nucleares contra el territorio soviético provocaría probablemente reticencias en el camino hacia el objetivo de una alianza occidental unificada política y militarmente. En este contexto, el rechazo por parte de Gran Bretaña y Francia de participar en el proceso de limitación de armamento podría interpretarse como un nuevo signo de pérdida de la confianza europea en la garantía nuclear norteamericana y, por extensión, en la OTAN en su conjunto. Si la alianza ha de permanecer tan cohesinada como hasta ahora, la prudencia dicta fomentar la integración de las fuerzas europeas en el proceso de control de armamentos.

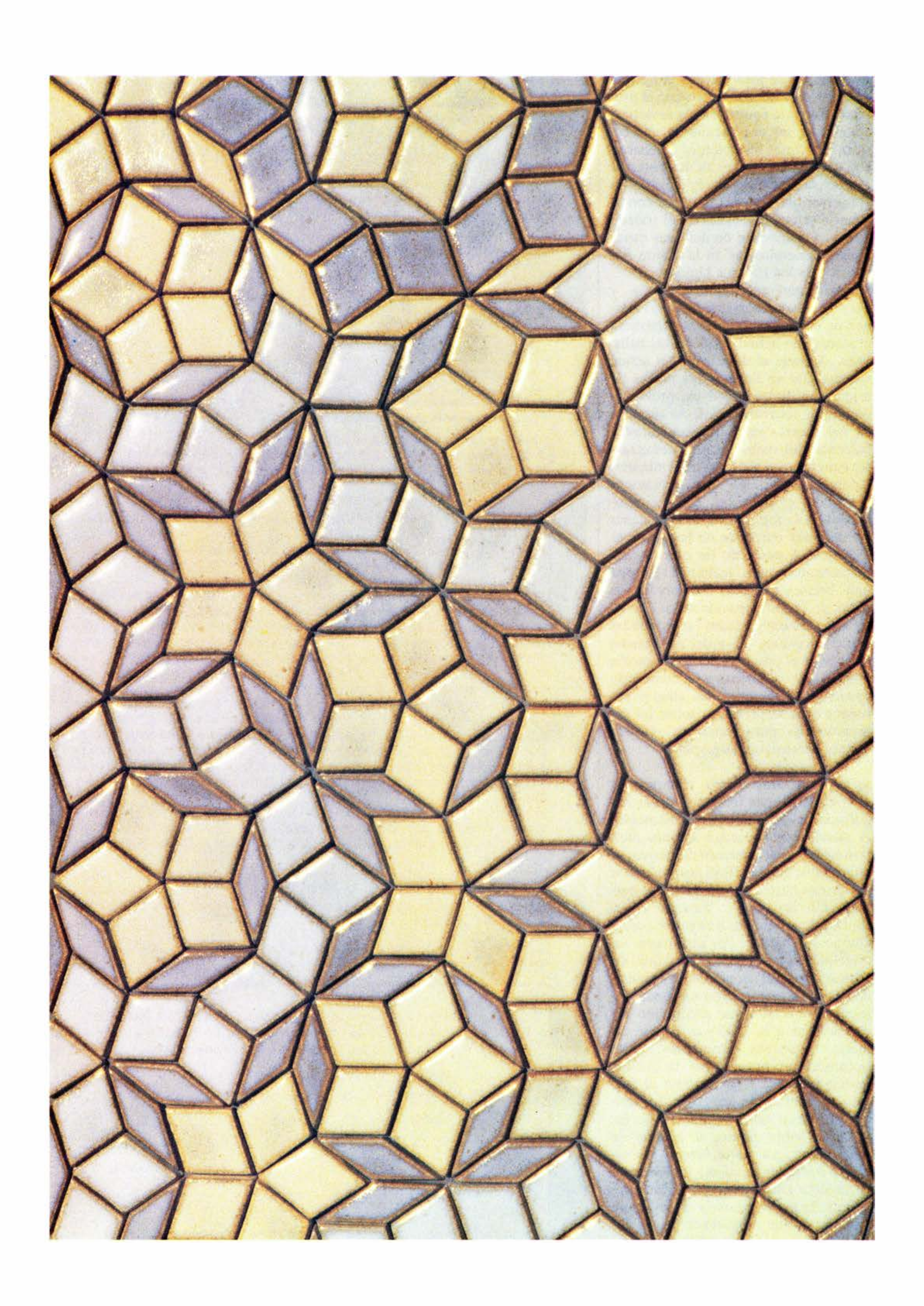
La inclusión de las fuerzas estratégicas europeas en los acuerdos podría revestir varias formas. Una solución simple consistiría en establecer los mismos techos en el número total de cabezas nucleares y de vehículos de transporte nuclear para la Unión Soviética que para la OTAN. Tal medida probablemente no sería aceptable políticamente en Europa ni en los Estados Unidos. Otra solución: Gran Bretaña y Francia podrían negociar bilateralmente con la URSS protocolos o tratados por separado relacionados con el acuerdo conjunto soviético-norteamericano. Habría así una aproximación directa anglofrancesa a las negociaciones de control de armamento. Tales limitaciones, independientes en el arsenal británico y en el francés, allanarían el terreno para futuras negociaciones multilaterales destinadas a reducir los contingentes nucleares.

Aunque Gran Bretaña y Francia han exigido ciertas condiciones previas antes de participar en cualquier discusión de control de armas (tales como la reducción significativa de los arsenales de las superpotencias), el asegurar la colaboración europea, en último término, dependería de cómo se resolviera el tema crucial de la defensa estratégica. Ambos países europeos han manifestado que antes de entablar conversaciones sobre armas estratégicas quieren garantías de que las negociaciones sobre la limitación de las armas defensi-

vas gozarán de prioridad en la agenda de trabajo. También temen que el programa IDE y la contrapartida soviética, además de ser el principio de una carrera de armas antisatélite, amenacen con socavar los límites de los sistemas ABM existentes bajo el régimen de las conversaciones SALT. La última consecuencia sería la derogación del tratado ABM y el despliegue de defensas estratégicas generalizadas en la Unión Soviética y en los Estados Unidos.

Evidentemente, Gran Bretaña y Francia estarían bastante mejor al margen de cualquier acuerdo si persistiera el status quo actual sin defensas balísticas. Aunque el desarrollo del actual sistema Galosh limitara los planes de asignación de los objetivos, probablemente no socavaría el efecto disuario de las fuerzas nucleares británicas y francesas. Sin embargo, un sistema ABM soviético para el siglo XXI sí las minaría. Además, un sistema ABM norteamericano para el siglo XXI, como el propuesto en la IDE, podría desenganchar las defensas europeas de las estadounidenses. A pesar de las ofertas norteamericanas para incluir a Europa bajo futuros paraguas defensivos, y a pesar de la participación oficial británica en investigaciones relacionadas con el programa IDE y del entusiasmo francés en el proyecto de investigación multilateral en defensa y en tecnología conocido por Eureka, los aliados europeos ejercen presiones sobre las superpotencias para frenar su reforzamiento defensivo a largo plazo.

No está claro cómo tratarán los EE.UU. este tema en futuras negociaciones de control de armamento. A menos que concedan algunas limitaciones en el armamento defensivo, es improbable que la URSS acepte limitar sus armas nucleares ofensivas; la participación británica y francesa en el control de armamentos seguiría siendo entonces debatible. Por otra parte, un ofrecimiento norteamericano que vigorizara las limitaciones de los sistemas defensivos y que incluyera algunas restricciones en las armas antisatélite podría inducir a la URSS a reducir sus fuerzas ofensivas estratégicas. Tales circunstancias propiciarían la participación británica y francesa en el proceso de control de armamento, particularmente si las concesiones de los EE.UU. sobre límites defensivos se presentaran, en parte, como un esfuerzo por tener en cuenta los intereses aliados. La participación de Gran Bretaña y Francia ayudaría a sellar un acuerdo formal asegurando la viabilidad de su disuasión independiente.



Cuasicristales

Estos materiales descubiertos recientemente poseen un nuevo tipo de orden, intermedio entre el cristalino y el amorfo. Su estructura se puede interpretar mediante la teoría matemática de los embaldosados

David R. Nelson

En el año 1984 un grupo de investigadores del National Bureau of Standards (Instituto Nacional de Pesas y Medidas) descubrió un material que parecía violar uno de los teoremas más antiguos e importantes de la cristalografía. Este material evidenciaba el mismo tipo de orden que los cristales, pero también parecía ser simétrico en unos términos que son físicamente imposibles para cualquier sustancia cristalina. Las investigaciones posteriores de la microestructura del material han puesto de manifiesto que posee un nuevo tipo de orden, que no es cristalino ni totalmente amorfo. Diríase que los cuerpos estructurados según este nuevo tipo de orden tienden un puente entre los cristales convencionales y los materiales conocidos como vidrios metálicos, es decir, los sólidos que se obtienen cuando los materiales fundidos se enfrían tan rápidamente que los átomos componentes no tienen tiempo de formar una red cristalina. Los nuevos materiales reciben el nombre de cuasicristales.

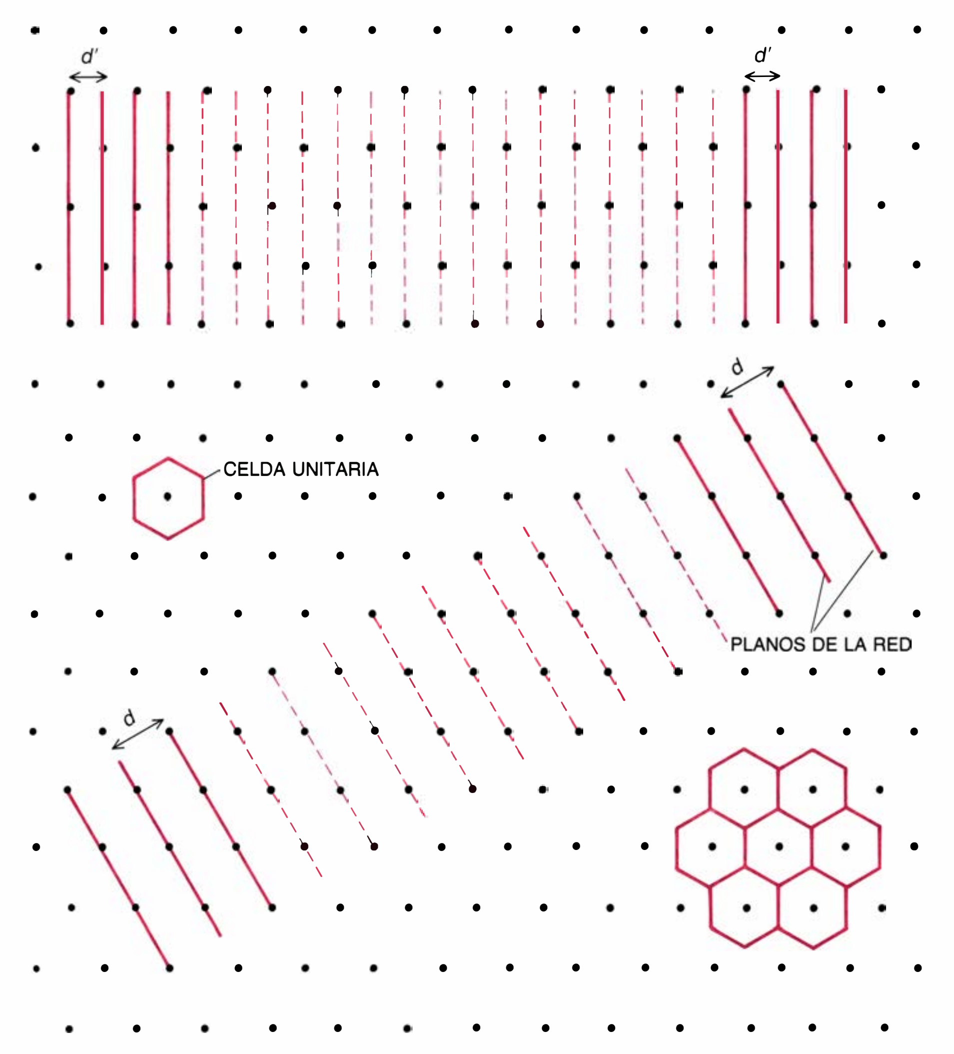
Un cristal normal está constituido por una estructura de átomos o moléculas bien ordenada. Forma una estructura reticular, en la que una serie de "celdas unitarias" idénticas –los bloques que integran el cristal, cada uno de los cuales contiene exactamente la misma distribución de átomos– se agrupan de manera regular y periódica para llenar el espacio. Toda estructura cristalina presenta ciertas simetrías características. Por ejemplo, se dice que un cristal posee simetría rotacional de tercer orden si la estructura del cristal no varía al girar el cristal un tercio de circunferencia completa, es decir, 120 grados. (Un ejemplo elemental de una forma con simetría rotacional de tercer orden es el triángulo equilátero.) Los cristales pueden adquirir también simetría rotacional de cuarto o sexto orden (como sucede con un cuadrado o un hexágono, respectivamente). Pero ningún cristal ofrecerá simetría rotacional de quinto orden por la misma razón por la que es imposible cubrir completamente un plano utilizando formas que posean simetría de quinto orden, tales como pentágonos, sin que se produzcan algunos solapamientos.

Ello explica que cristalógrafos y físicos de la materia condensada se vieran enormemente sorprendidos cuando Dany Shechtman, Ilan Blech, Denis Gratias y John W. Cahn dieron a conocer las propiedades cristalográficas de una muestra de una aleación especial de aluminio y manganeso enfriada rápidamente. Esta muestra había difundido un haz de electrones sobre una emulsión fotográfica de forma tal que la figura resultante correspondía a una simetría de quinto orden. La elevada definición de esta figura indicaba que el material poseía un orden de gran alcance, dado que esa definición significa que un gran número de átomos situados en lugares diferentes de la muestra han reflejado el haz de electrones de la misma forma. La simetría de la figura se mantenía constante con independencia de la posición relativa de la muestra respecto al haz y ponía de manifiesto que la estructura del material en cuestión tenía algún tipo de simetría de quinto orden. Otros investigadores han encontrado que estas mismas propiedades se presentan también en otros muchos metales, además del aluminio y el manganeso.

El análisis posterior de la figura de difracción ha revelado el origen de estas sorprendentes propiedades. La estructura de la mayoría de los cristales se basa en celdas unitarias tan sencillas como el cubo, el tetraedro y el octaedro. La estructura de los nuevos materiales (que denominaré genéricamente shechtmanita, siguiendo una sugerencia de Cahn) está basada en el icosaedro, un polígono con 20 caras, cada una de las cuales es un triángulo equilátero. Hasta que se produjo este descubrimiento, la bibliografía física había defendido una conspiración de silencio en relación con el icosaedro. Muchos textos de física prestigiosos afirman sencillamente que el icosaedro "carece de interés desde el punto de vista físico". La razón de este escepticismo radica en que el icosaedro posee una simetría de quinto orden –en cada vértice se cortan cinco caras– y, por tanto, no puede servir de celda unitaria de ningún cristal convencional.

¿Cómo se las ha arreglado la schechtmanita para abrirse camino a través de un teorema de la cristalografía aceptado universalmente? La respuesta a esta pregunta se ha obtenido a partir del estudio de la estructura microscópica de aleaciones metálicas enfriadas rápidamente y de la teoría matemática de los teselados.

1. EMBALDOSADO DE PENROSE: análogo bidimensional de unos materiales descubiertos recientemente y conocidos con el nombre de cuasicristales o shechtmanitas. La figura no es periódica (en el sentido de que no puede descomponerse en celdas unitarias que se repitan indefinidamente), pero posee cierto tipo de ordenación que se puede asociar con los teselados periódicos. Por ejemplo, todos los decágonos (figuras con 10 lados casi circulares) que se ponen de manifiesto a lo largo del embaldosado tienen la misma orientación (los lados de cualquier decágono son paralelos a los lados de los otros), tal como sucede con las celdas unitarias de un teselado periódico. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede en cualquier posible embaldosado periódico, los embaldosados de Penrose poseen simetría de rotación de quinto orden: la figura permanece inalterada cuando gira un ángulo igual a la quinta parte de una circunferencia completa (72 grados). Al igual que los teselados de Penrose, la estructura microscópica de los cuasicristales posee también simetría de quinto orden. La simetría de quinto orden es imposible en cualquier material cristalino convencional (es decir, en cualquier material constituido por celdas unitarias sencillas que se repiten periódicamente); por tanto, aunque la shechtmanita presenta una ordenación elevada no constituye un cristal ordinario. Los embaldosados de Penrose fueron inventados por Roger Penrose, físico de la Universidad de Oxford. Las baldosas reproducidas en la figura han sido fabricadas por Saxe Patterson (Taos Clay Products) de Taos, Nuevo México.



2. ESTA RED PERIODICA ilustra los dos tipos de ordenación periódica de largo alcance que son característicos de los cristales ordinarios. La figura se puede subdividir en cierto número de hexágonos, cada uno de los cuales posee un "átomo" en su centro. Dado que los hexágonos situados en una parte del cristal (*inferior derecha*) tienen la misma orientación que los situados en cualquier otro lugar (*centro izquierda*), se dice que la red posee ''ordenación de orientación de largo alcance''. La "ordenación de traslación de largo alcance" se pone de manifiesto mediante una familia de líneas paralelas que va desde el extremo inferior izquierdo al centro derecha de la red. Cuando estas líneas, equivalentes a los planos de la red de los cristales tridimensionales, se dibujan de forma tal que todos los átomos están situados sobre una línea u otra, la distancia entre dos líneas adyacentes es exactamente la misma a lo largo de todo el cristal. En consecuencia, la posición y la dirección de las líneas de cualquier parte del cristal se pueden determinar trasladando o moviendo las líneas de un lado a otro del cristal. Existen muchas familias de líneas paralelas; otra de estas familias aparece dibujada en la parte superior de la red. La distancia entre dos líneas adyacentes varía de una familia a otra.

Para adentrarnos en la estructura básica de los cuasicristales de shechtmanita es necesario dominar la estructura de un cristal ordinario. Los cristales normales poseen dos clases de orden de largo alcance: orden de orientación y orden de traslación. Estas ordenaciones se pueden observar en una de las disposiciones cristalinas más sencillas de los átomos, la red triangular, que es la configuración que presentan las bolas de billar cuando son colocadas para comenzar el juego en el billar americano [*véase la figura 2*].

En esta red bidimensional, cada átomo está situado en el centro de una celda hexagonal constituida por sus seis vecinos. Este hexágono con un átomo central es la celda unitaria del cristal: el cristal se puede descomponer en una serie repetida de hexágonos. Dado que todos los hexágonos tienen la misma orientación –es decir, dado que los lados de cada hexágono son paralelos a los lados de todos los demás– se dice que el cristal presenta un orden de orientación de largo alcance.

La otra clase de orden de largo alcance que se presenta en los cristales se puede poner de manifiesto dibujando una familia de líneas paralelas en la red. Cuando éstas se trazan de suerte tal que todos los átomos del cristal caigan en una línea u otra, todas las líneas se presentan espaciadas regularmente a lo largo del mismo. En consecuencia, las líneas situadas en un lugar determinado del cristal se pueden trasladar o mover hasta su ajuste exacto con las líneas situadas en otro lugar diferente. Por tanto, examinando una parte pequeña del cristal se determinará la posición exacta y el espaciado de las líneas en cualquier otro lugar: el cristal presenta un orden de traslación de largo alcance.

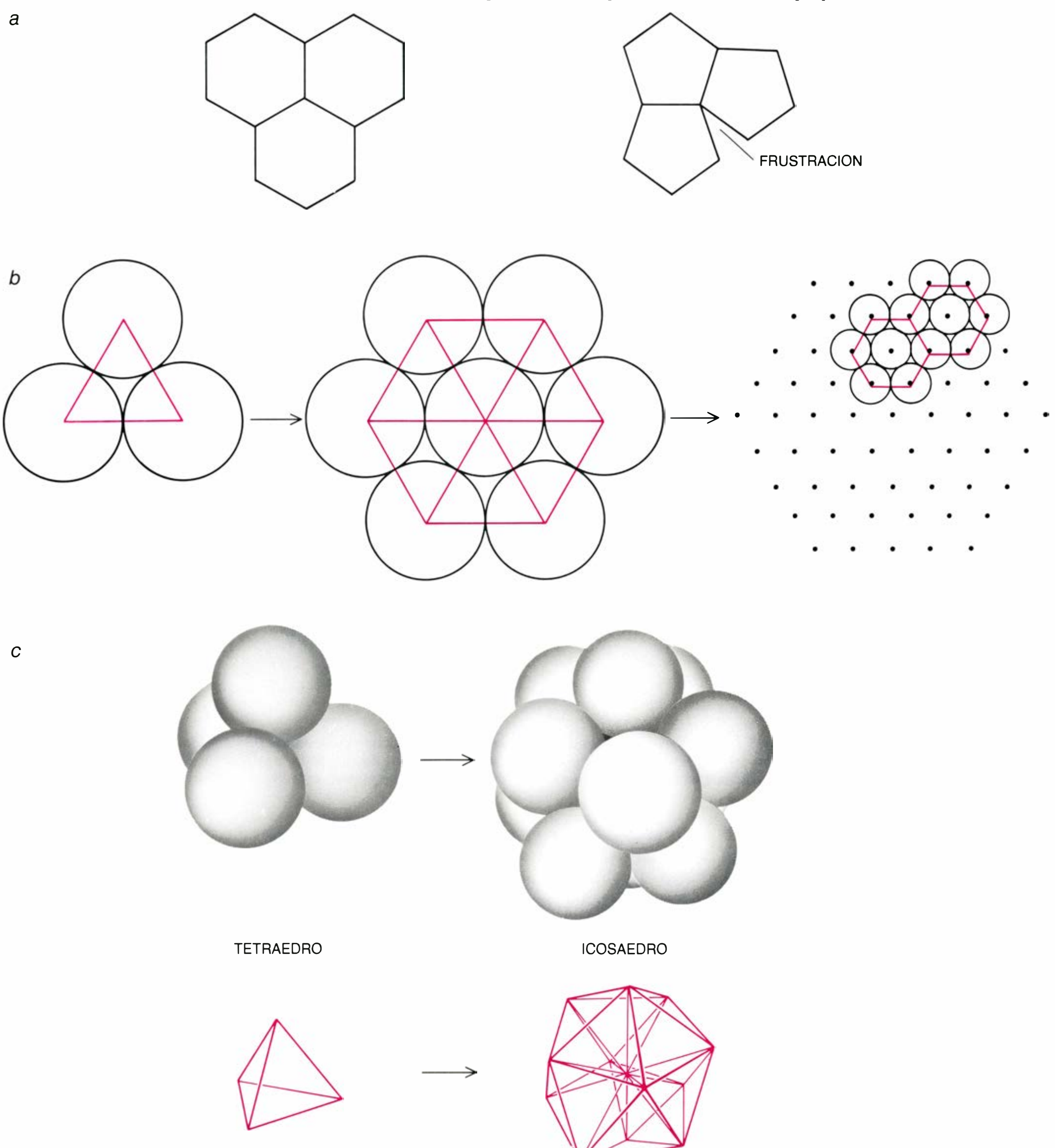
En un cristal convencional existen muchas familias de líneas paralelas. Cada familia de éstas se halla orientada en una dirección diferente; el espaciado entre las líneas puede variar de una familia a otra. En un cristal tridimensional las líneas se convierten en planos y se denominan planos de la red. Cuando un haz de rayos X o de electrones se dirige sobre el cristal es reflejado y difundido por los planos de la red. Estudiando las direcciones e intensidad de los haces difundidos los investigadores averiguan qué familias de los planos de la red existen en el cristal; con frecuencia se deducen incluso las localizaciones exactas de los átomos. La shechtmanita se descubrió de esta forma. La figura que encontraron Shechtman y sus colaboradores ponía de manifiesto que su muestra poseía planos de la red, pero la simetría de quinto orden de la figura indicaba que el material en cuestión no era un cristal ordinario.

Para comprobar por qué un cristal ordinario no puede tener una simetría de quinto orden basta intentar rellenar un plano con celdas pentagonales en lugar de hexagonales. Los pentágonos regulares –las formas más sencillas con simetría de quinto orden– no pueden servir de celdas unitarias de un cristal. La explicación de este hecho radica en que las celdas pentagonales, en contraste con las hexagonales, no se pueden acoplar sin dejar espacios vacíos entre ellas: cuando se unen dos pentágonos acoplando dos caras paralelas, es imposible unir a ellos un tercer pentágono de forma tal que se ajuste perfectamente con sus dos vecinos. Este desajuste es un ejemplo de lo que los físicos de la materia condensada denominan frustración. En tres dimensiones, al igual que en dos, es imposible acoplar las formas que poseen simetría de quinto orden sin que aparezca algún grado de frustración.

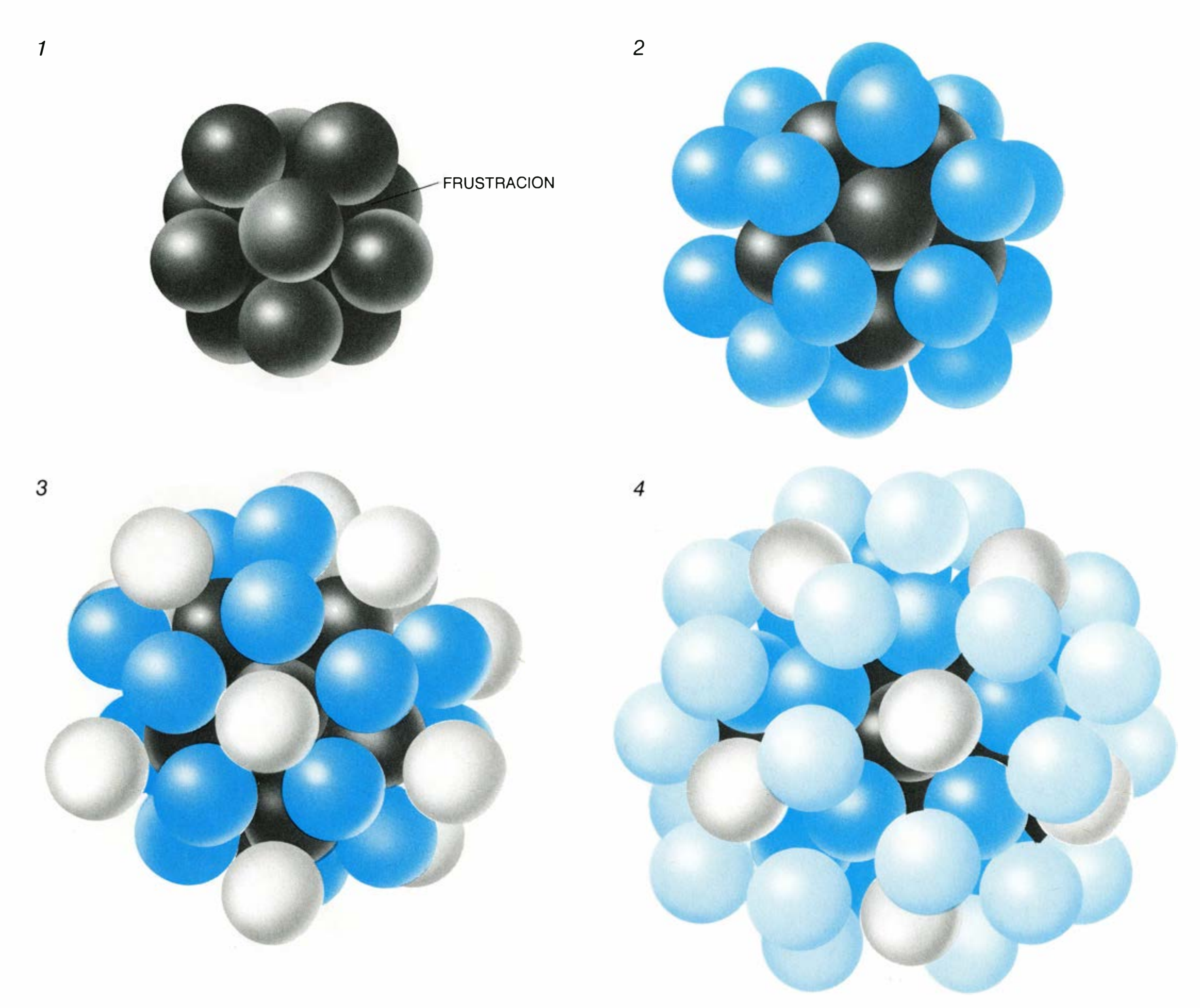
El hexágono es la unidad de empaquetamiento bidimensional que produce mayor rendimiento: tres discos se acoplan perfectamente entre sí para formar un triángulo y seis de tales

triángulos se combinan para generar un hexágono constituido por siete discos. Sorprendentemente, una línea de razonamiento similar indica que el icosaedro (que, debido a su simetría de quinto orden, no puede ser la unidad fundamental de un empaquetamiento regular) debería ser en realidad el elemento de empaquetamiento natural en tres dimensiones: cuatro esferas macizas, que podrían representar a otros tantos átomos, se acoplan íntimamente para formar un tetraedro (la estructura con forma de "pirámide" en que se disponen las balas de cañón en algunos monumentos castrenses) y, con pequeñas distorsiones, 20 de tales tetraedros se acoplan para formar un icosaedro constituido por 13 átomos.

¿Qué sucede entonces cuando se intenta empaquetar esferas en una for-



3. NO ES POSIBLE EL EMPAQUETAMIENTO COMPACTO cuando se utilizan únicamente formas con simetría de quinto orden. Tres hexágonos se pueden unir entre sí sin dejar ningún hueco por medio, pero con tres pentágonos dicha unión es irrealizable (*a*); el ajuste defectuoso recibe el nombre técnico de frustración. En dos dimensiones (*b*), el hexágono constituye la unidad de empaquetamiento más eficiente: tres discos se unen perfectamente para formar un triángulo, seis triángulos se unen perfectamente para formar un hexágono y los hexágonos se unen perfectamente para cubrir un plano. En tres dimensiones (*c*), cuatro esferas se empaquetan de forma compacta para dar lugar a un tetraedro y, con pequeñas distorsiones, por unión de 20 tetraedros se obtiene un icosaedro. Sin embargo, los icosaedros poseen simetría de quinto orden (en cada vértice se unen cinco caras triangulares) y su unión no puede ser perfecta. Dado que los icosaedros no se pueden empaquetar de suerte tal que se llene el espacio en su totalidad, tampoco pueden servir como celdas unitarias de un cristal.



4. AGREGADO ICOSAEDRICO de átomos. Nos hallamos ante una forma eficiente de llenar el espacio para distancias cortas, pero su rendimiento disminuye a medida que aumenta su tamaño: los huecos existentes entre átomos adyacentes son mayores en las capas más externas del agregado. En algunas aleaciones, por ejemplo la $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$, esta frustración se puede reducir colocando algunos átomos en los huecos que aparecen en el tercer modelo de esta figura.

mación modelada sobre un icosaedro? Para empezar, el icosaedro con 13 átomos no es perfecto. Está ligeramente frustrado, debido a la existencia de pequeños huecos entre los 12 átomos de su superficie; la distancia que separa a cada uno de estos átomos de sus vecinos es un 5 por ciento mayor que la que los separa del átomo central. Al igual que sucedía con los pentágonos en un plano, los átomos no se pueden asentar a distancias idénticas de todos sus vecinos más próximos. La adición de más capas de partículas sólo sirve para agravar la frustración: los huecos existentes entre los átomos de las capas más exteriores se hacen paulatinamente mayores [*véase la figura 4*].

Debido a este aumento del grado de frustración, la ordenación con forma de icosaedro no puede propagarse a lo largo de un cristal. Sin embargo, para distancias cortas el empaquetamiento icosaédrico es muy eficiente. Siguiendo esta línea de razonamiento, Sir Charles Frank, de la Universidad de Bristol, sugirió, en 1952, que en líquidos densos subenfriados (es decir, líquidos enfriados por debajo de su punto de solidificación) podían existir regiones de pequeña extensión con simetría icosaédrica. En tales líquidos cabía prever la existencia de muchas zonas donde algunos agregados pequeños de átomos se unieran entre sí para engendrar icosaedros. Más tarde, se advirtió que si dicho líquido subenfriado formara un vidrio antes de cristalizar, el vidrio estaría constituido por un conjunto de agregados icosaédricos de pequeño tamaño unidos entre sí. En tal caso, los átomos del vidrio presentarían una ordenación icosaédrica de corto alcance en muchas regiones.

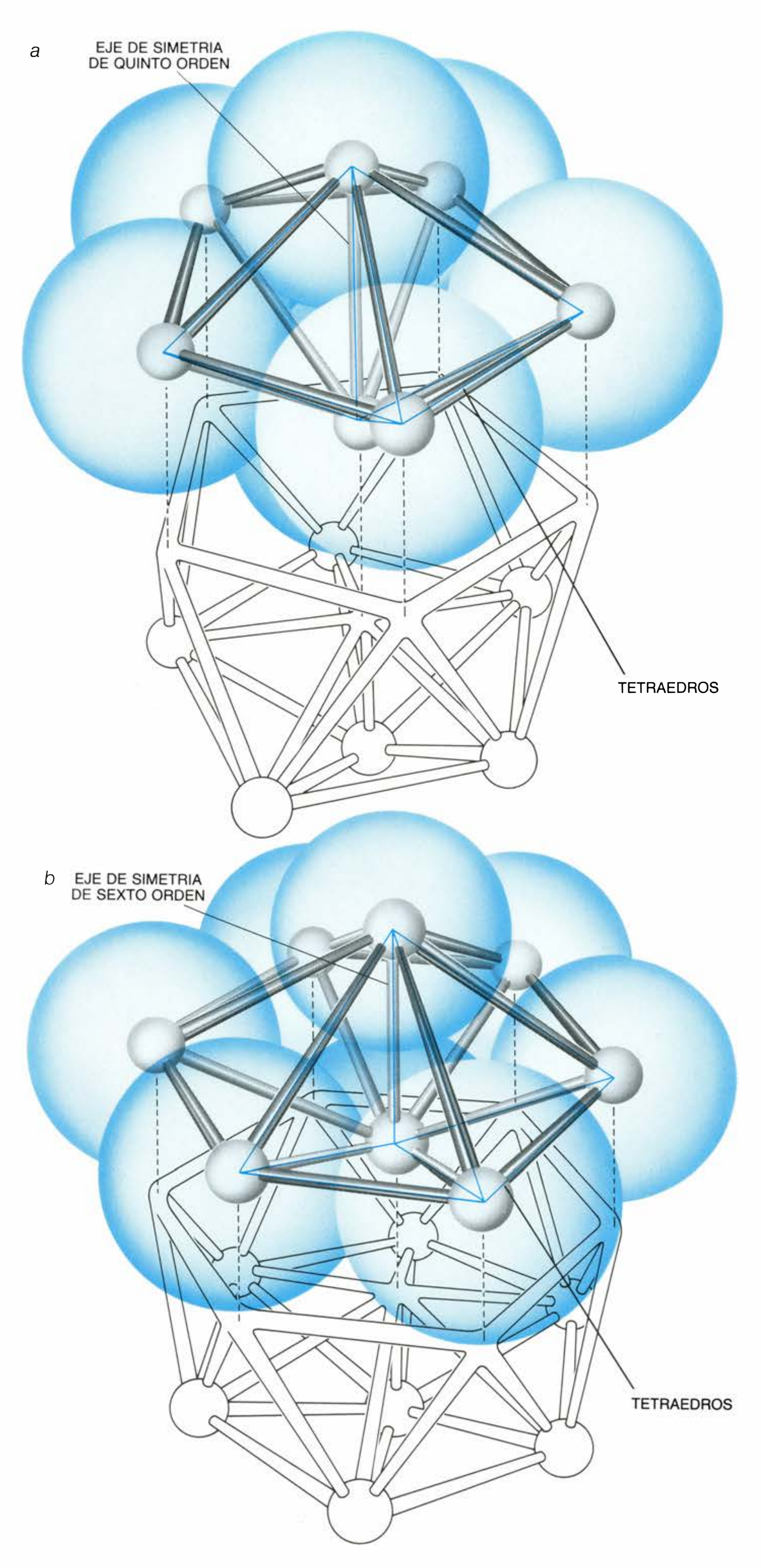
Las predicciones de Frank parecen haber sido correctas. A principios de la década de 1960 los investigadores lograron enfriar metales con la velocidad suficiente para solidificarlos antes de que cristalizaran. A finales de ese decenio y principios del siguiente se encontró que las posiciones de los átomos de estos vidrios estaban muy condicionadas por ciertas agrupaciones desordenadas de esferas macizas. Estas agrupaciones contienen muchos fragmentos de icosaedros y, por tanto, aparece una ordenación icosaédrica de corto alcance como elemento estructural de gran importancia en los vidrios metálicos y en los líquidos enfriados rápidamente.

Un vidrio metálico extremadamente simple es el formado a partir de una aleación de magnesio y zinc. Un compuesto relacionado con este material,

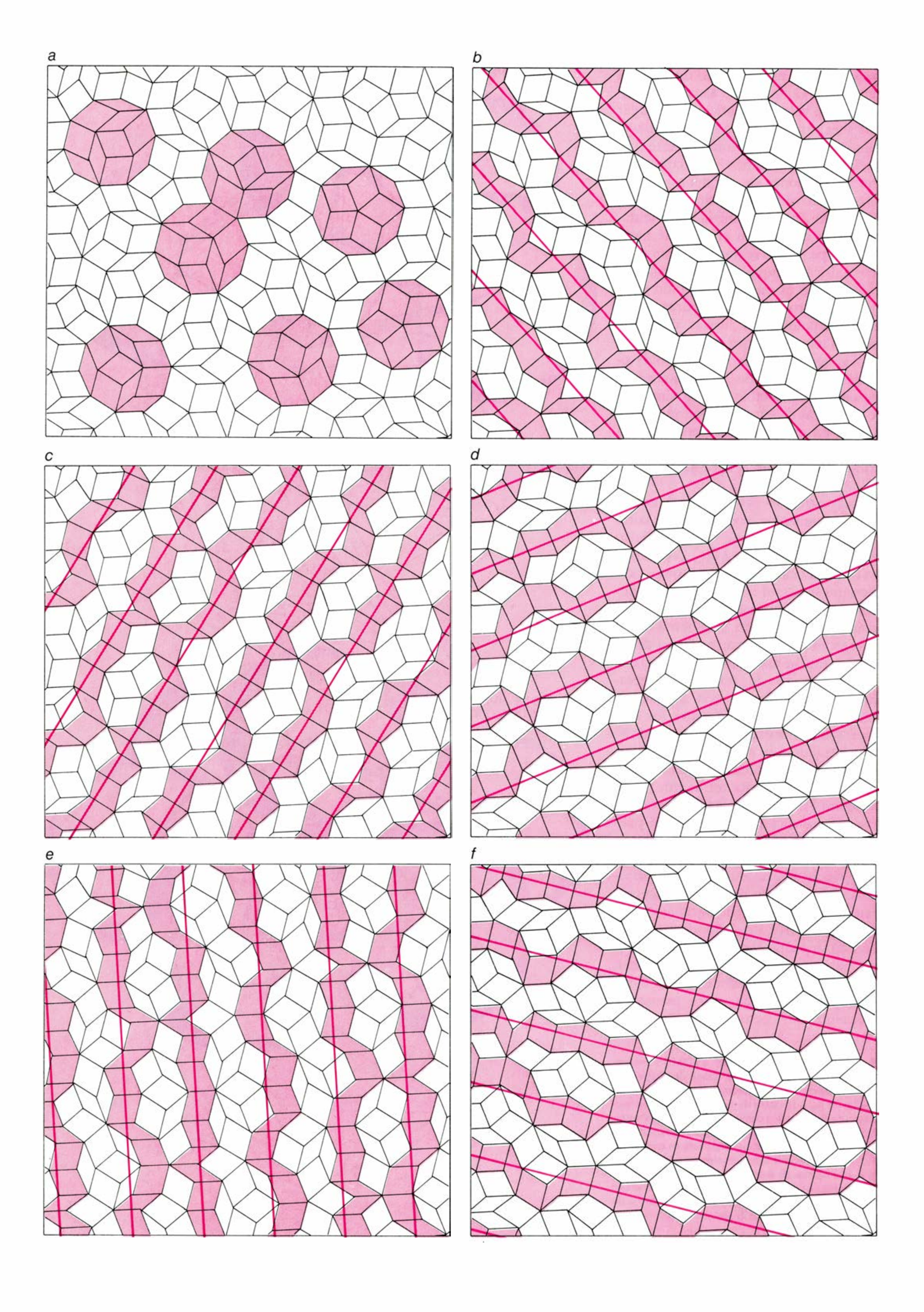
la aleación Mg_{32} (Al,Zn)$_{49}$, reviste especial interés en el estudio de los cuasicristales. Cuando esta aleación se enfría con la velocidad suficiente da lugar a la shechtmanita. Si se enfrían todavía más deprisa, las aleaciones de este tipo suelen formar vidrios que contienen muchas regiones de pequeñas dimensiones con simetría icosaédrica. Si el Mg_{32} (Al,Zn)$_{49}$ se enfría más lentamente se obtiene un cristal que aloja todavía pequeñas regiones con simetría icosaédrica, aunque el cristal en su conjunto ya no es un conglomerado puro de icosaedros. Los icosaedros están empaquetados, con ligeras distorsiones, en una estructura con simetría cúbica general; por tanto, la prohibida simetría icosaédrica de largo alcance está ausente. Es probable que las simetrías icosaédricas de corto alcance que se observan en estos estados vítreos y cristalinos estén relacionadas con la simetría icosaédrica de la shechtmanita.

La frustración natural de los empaquetamientos icosaédricos de corto alcance que se pone de manifiesto en los cristales de Mg_{32} (Al,Zn)$_{49}$, se debilita cuando algunos átomos adicionales se sitúan en las grietas existentes entre los átomos de las capas icosaédricas y, por tanto, la simetría de los agregados resulta perturbada. La densa configuración resultante consiste en un cierto número de tetraedros ligeramente distorsionados con átomos en sus vértices; los enlaces entre los átomos son las aristas de los tetraedros. Los tetraedros se unen entre sí por sus caras comunes y cada arista o enlace se comparte entre varios tetraedros [*véase la figura 5*]. Tanto los vidrios metálicos como las aleaciones cristalinas se pueden analizar en términos similares.

Cada enlace es compartido por cuatro, cinco o seis tetraedros distorsionados; la mayoría de ellos se comparten entre cinco. Esta agrupación de cinco tetraedros alrededor de un enlace común se puede considerar como parte de un icosaedro. En consecuencia, siempre que se producen estas agrupaciones la aleación posee estructura icosaédrica de corto alcance. Para aco-



5. CONFIGURACIONES DE ATOMOS evidenciadas en una aglomeración densa de partículas; pueden interpretarse como empaquetamientos compactos en los que cierto número de tetraedros ligeramente deformados comparten enlaces comunes. La mayoría de los enlaces son compartidos por cinco tetraedros (*a*); originan un fragmento de icosaedro. Con el fin de reducir la frustración propia de los empaquetamientos de icosaedros, algunos enlaces deben compartirse por seis tetraedros (*b*), formando un fragmento de estructura sólida semejante a un icosaedro pero con un eje de simetría de sexto orden.


a
b
c
d
e
f

modar la frustración correspondiente en un empaquetamiento de icosaedros, al menos un diez por ciento de los enlaces debe ser compartido por seis tetraedros en lugar de cinco.

De aquí se desprende que todos los enlaces de sexto y cuarto orden que existen en el material estarán conectados entre sí por ciertas líneas largas conocidas con el nombre de disclinaciones en cuña. Las disclinaciones en cuña no pueden empezar o acabar en el interior del material, y a bajas temperaturas se cruzan entre sí muy raramente. Cuando los metales fundidos se enfrían rápidamente, estas líneas se pueden entrecruzar, dando lugar a la formación de un vidrio metálico. Cuando los metales se enfrían más lentamente, las líneas de disclinación en cuña tienen suficiente tiempo para entrecruzarse y se enlazan para tejer redes periódicas. En muchas aleaciones, el material resultante consiste en una red regular de enlaces de sexto orden incluida en el seno de una estructura icosaédrica. Esta fase cristalina de la aleación se conoce con el nombre de fase de Frank-Kasper. En el caso de la fase de Frank-Kasper del $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ los átomos de magnesio se hallan situados en los lugares que están unidos por enlaces de sexto orden; los átomos de zinc y de aluminio, más pequeños, ocupan los restantes lugares del icosaedro.

Los vidrios metálicos y las fases de Frank-Kasper son buenos ejemplos de cómo se forma el ordenamiento icosaédrico de corto alcance y de cómo este tipo de ordenamiento se acomoda en un cristal que no posee una ordenación icosaédrica de largo alcance. La interpretación de la ordenación icosaédrica de largo alcance en la shechtmanita exige algunas consideraciones adicionales basadas en la teoría matemática del embaldosado.

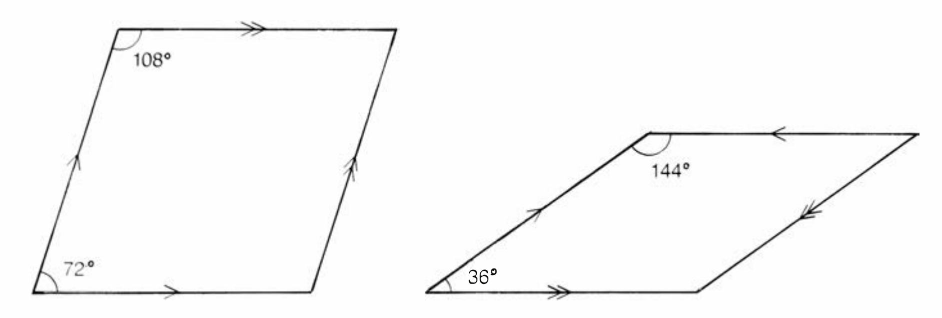
Un embaldosado puede ser una buena analogía de un cristal. De la misma forma que en un cristal el espacio tridimensional se llena con celdas unitarias, en un embaldosado el espacio bidimensional se llena con teselas. Muchas de las propiedades de los cristales tridimensionales se observan también en los embaldosados bidimensionales. Por ejemplo, el empaquetamiento hexagonal de dos dimensiones posee los mismos planos de la red y simetría de orientación de largo alcance que existen en los cristales de tres dimensiones. Por tanto, es razonable que las propiedades peculiares de los cuasicristales se puedan interpretar de acuerdo con algún tipo de embaldosado adecuado.

El tipo de embaldosado que constituye el mejor modelo de los cuasicristales se desarrolló en realidad diez años antes del descubrimiento de la shechtmanita [véase "Juegos matemáticos", de Martin Gardner; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1977]. En 1974, Roger Penrose, un físico matemático de la Universidad de Oxford, estaba experimentando sobre las formas de teselar un plano aperiódicamente (es decir, de suerte tal que el conjunto de baldosas no pudiera dividirse en celdas unitarias sencillas como el hexágono). Penrose descubrió una clase de embaldosado que sólo requiere teselas con dos formas diferentes; estas dos formas son rombos, es decir, paralelogramos con lados de igual longitud. Los ángulos internos de uno de los rombos son de 36 y 144 grados y los del otro 72 y 108 grados; ambos rombos se ajustan entre sí siguiendo ciertas reglas específicas. En un embaldosado infinito de Penrose la relación entre el número de rombos "gruesos" y el número de rombos "delgados" es exactamente igual a la media dorada (aproximadamente 1,618). Por ser el valor de esta relación un número irracional, se hace imposible romper un embaldosado en celdas unitarias sencillas que contengan un número entero de ambas clases de rombos.

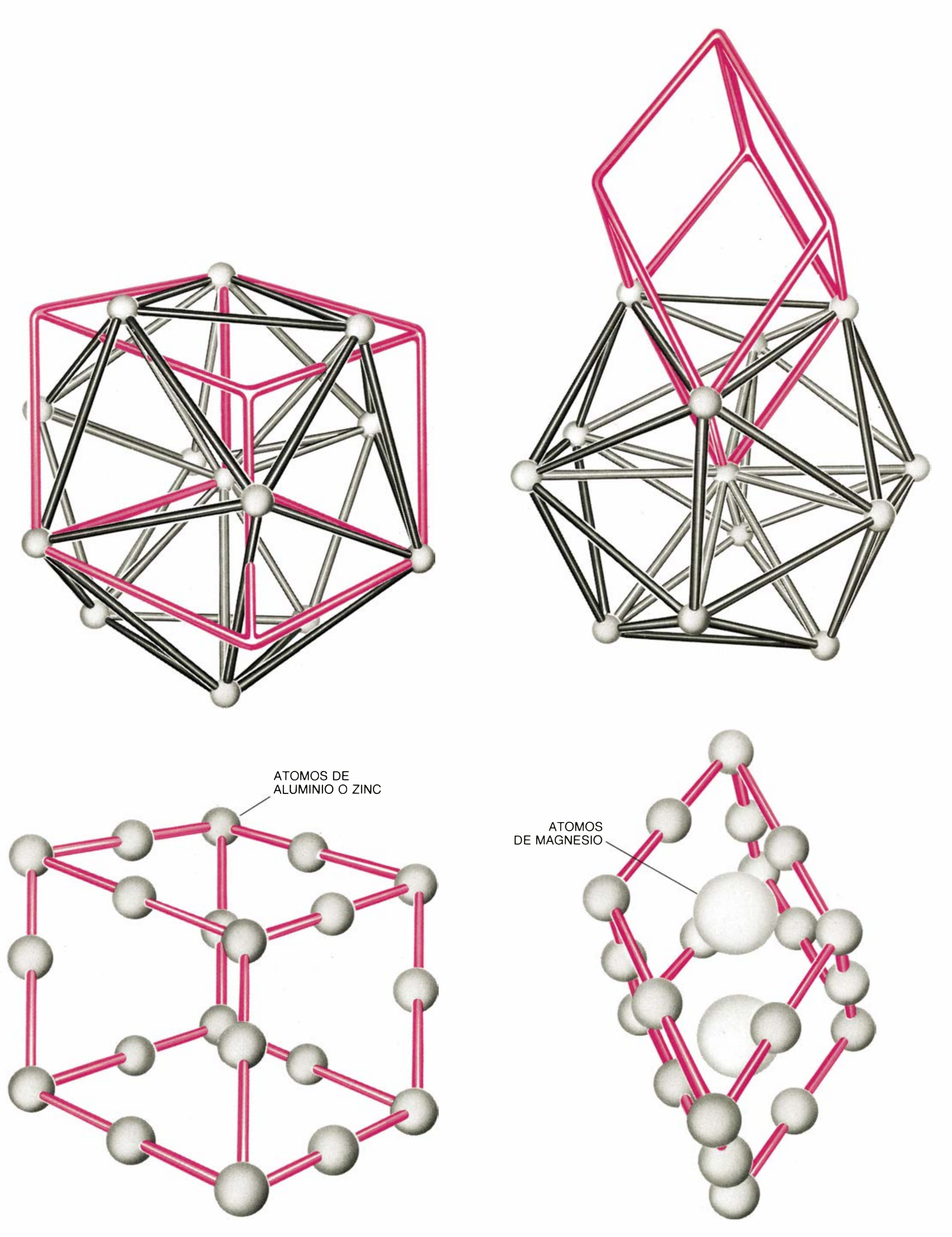
Al igual que sucede con la shechtmanita, los embaldosados de Penrose no son cristalinos en el sentido usual del término, pero poseen muchas propiedades cristalinas. Así, en un embaldosado de Penrose se pueden formar muchos decágonos o polígonos regulares de diez lados [*véase la figura 6*]. Al igual que los hexágonos, que son las celdas unitarias del cristal de "bolas de billar" de dos dimensiones, todos los decágonos tienen exactamente la misma orientación. E igual que la shechtmanita, el embaldosado de Penrose posee la misma ordenación de orientación de largo alcance que las redes cristalinas convencionales.

De forma más sutil, los embaldosados de Penrose poseen también cierta ordenación de traslación. Para poner de manifiesto este hecho basta con sombrear los rombos cuyos lados son paralelos a una dirección dada. Los rombos sombreados forman un conjunto de líneas dentadas irregulares, cada una de las cuales, en términos medios, se aproxima a una línea recta. Todas las líneas son paralelas y su espaciado se mantiene aproximadamente constante. Por tanto, estadísticamente hablando, un embaldosado de Penrose presenta una ordenación de traslación de largo alcance, además de una ordenación de orientación.

Como los cuasicristales, los embaldosados de Penrose poseen también cierta clase de simetría de quinto orden. En un embaldosado de Penrose los rombos sombreados se distribuyen en cinco familias de líneas paralelas. Estas líneas discurren a lo largo de direcciones que podrían ser paralelas a los lados de un pentágono regular y que se cortan según ángulos que son múltiplos de 72 grados, es decir, la quinta parte de una circunferencia completa. Se puede demostrar que estas líneas, al igual que los planos de la red de un cristal ordinario, difunden los haces de electrones o de rayos X. Los haces reflejados en una estructura de Penrose presentarán simetría de rotación de quinto orden, cualquiera que sea la zona sobre la que incida el haz bombardeante. La apariencia desordenada de los planos de la red es similar a la



6. ORDENACION DE LARGO ALCANCE en un embaldosado de Penrose; resulta similar a la de un cristal ordinario. Ahora bien, la existencia de algunas pequeñas diferencias entre ambos permite que los embaldosados de Penrose posean cierta simetría de quinto orden. Todos los decágonos presentes en la figura (*a, color*) tienen la misma orientación, lo cual demuestra que dicha figura posee una simetría de orientación de largo alcance. Esta figura posee también cierta simetría de traslación de largo alcance. Cuando se colorean todos los rombos cuyos lados son paralelos a una dirección dada (*b*), se forman una serie de líneas dentadas aproximadamente paralelas e igualmente espaciadas entre sí, lo mismo que sucede con los planos de la red de un cristal ordinario. Existen cinco familias de planos de la red (*b-f*) que se cortan entre sí según ángulos múltiplos de 72 grados (la quinta parte de una circunferencia completa). En consecuencia, todas las figuras que se originan en la reflexión de electrones o de rayos X por estos planos tendrán simetría de quinto orden. Las figuras de Penrose se obtienen cuando los rombos representados en este diagrama se unen entre sí de forma tal que se ajusten las flechas superpuestas sobre sus caras. (Dibujos de George V. Kelvin.)



7. LOS ROMBOEDROS DE PENROSE (*color*) se unen entre sí y crean una estructura tridimensional que se parece a los embaldosados de Penrose de dos dimensiones. Los ángulos interiores de los romboedros están relacionados con los ángulos que forman los enlaces de una estructura icosaédrica. Un embaldosado de Penrose tridimensional posee simetría icosaédrica en el mismo sentido general que un embaldosado de Penrose bidimensional posee simetría de quinto orden. Ciertas aleaciones en particular se pueden describir en términos de los embaldosados de Penrose "decorando" cada romboedro de forma tal que un embaldosado extenso incluya la relación correcta de las distintas clases de átomos. Abajo se ofrece una de estas decoraciones para la aleación $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$.

encontrada en un cristal convencional para temperaturas por encima del cero absoluto, cuando los átomos están desordenados en virtud de las vibraciones térmicas. Por supuesto, en los embaldosados de Penrose, este desorden se presenta incluso a temperaturas del cero absoluto.

El primer trabajo que sugirió que los embaldosados de Penrose podrían aplicarse a los materiales reales fue realizado en 1981 por Alan L. MacKay, del Birbeck College de la Universidad de Londres. En 1984, Peter Kramer y Reinhardt Neri, de la Universidad de Tübingen, y Dov I. Levine y Paul J. Steinhardt, de la Universidad de Pennsylvania, cada grupo por su cuenta, desarrollaron una generalización tridimensional de los embaldosados de Penrose que ha resultado estar íntimamente relacionada con la estructura de la shechtmanita.

Al igual que sus estructuras equivalentes en dos dimensiones, los embaldosados tridimensionales de Penrose poseen simetría de orientación y de traslación de largo alcance. Poseen, además, simetría icosaédrica de largo alcance, del mismo modo que las estructuras bidimensionales de Penrose tienen simetría de quinto orden de largo alcance.

Las unidades básicas de los embaldosados tridimensionales son dos romboedros (figuras de seis caras, cada una de las cuales es un rombo; el romboedro tiene el aspecto de un cubo aplastado). Los ángulos sólidos interiores del romboedro son exactamente iguales a los ángulos formados por algunos enlaces de un agregado icosaédrico de átomos [*véase la figura 7*]. En un embaldosado de Penrose infinito y tridimensional la relación entre el número de una clase de romboedro y el número de la otra clase de romboedro es igual a la media dorada y, por tanto, los embaldosados tridimensionales de Penrose como la shechtmanita no se pueden describir en términos de una celda unitaria sencilla. Los cálculos relativos a la forma en que los embaldosados tridimensionales de Penrose difunden la radiación han proporcionado resultados muy similares a los encontrados experimentalmente en muestras reales de shechtmanita.

Los embaldosados tridimensionales de Penrose ofrecen un excelente punto de partida para la comprensión de la estructura atómica de los cuasicristales. Para interpretar la estructura de una aleación determinada de shechtmanita en términos de los embaldosados tridimensionales de Penrose se debe diseñar un modo de "decorar" o rellenar con átomos los dos romboedros citados anteriormente, de forma tal que será necesario considerar un número elevado de romboedros para dar cuenta de la proporción correcta de átomos de cada uno de los elementos constituyentes. Evidentemente, para describir un cristal ordinario bastaría con considerar una celda unitaria que se repetiría indefinidamente.

Los embaldosados de Penrose, tal como se ponen de manifiesto en la shechtmanita, representan un nuevo enfoque de la noción de cristal. Dado que las dos "celdas unitarias" se disponen sin una periodicidad estricta, el entorno que rodea a cada una de ellas es ligeramente diferente. En consecuencia, las fuerzas debidas a los átomos distantes varían de una celda a otra y se producen diferencias en las posiciones de los átomos de cada celda. Si pretendemos que los romboedros de Penrose proporcionen una descripción correcta de una aleación en particular de shechtmanita, dichas variaciones deben ser pequeñas.

Es probable que las reglas que rigen la colocación de los romboedros de Penrose en los materiales reales no se cumplan estrictamente. Se puede demostrar que pequeños grupos de celdas de Penrose se redistribuyen localmente de suerte tal que las reglas estrictas del acoplamiento resultan violadas aunque la ordenación del material se mantiene en líneas generales. Por ejemplo, en los embaldosados bidimensionales de Penrose, las teselas situadas en el interior de los decágonos se pueden sacar fuera, ser revueltas y finalmente reintegradas al decágono de suerte que en algunos lugares se violan las reglas del acoplamiento. Sin embargo, la orientación del decágono se mantiene inalterada y, por tanto, el cuasicristal guarda su ordenación de orientación de largo alcance. La operación anterior no corta los planos de la red (simplemente altera las líneas de zig-zag) y, por consiguiente, la forma en que los rayos X o los electrones son difundidos por los embaldosados sólo se modifica en detalles de poca importancia.

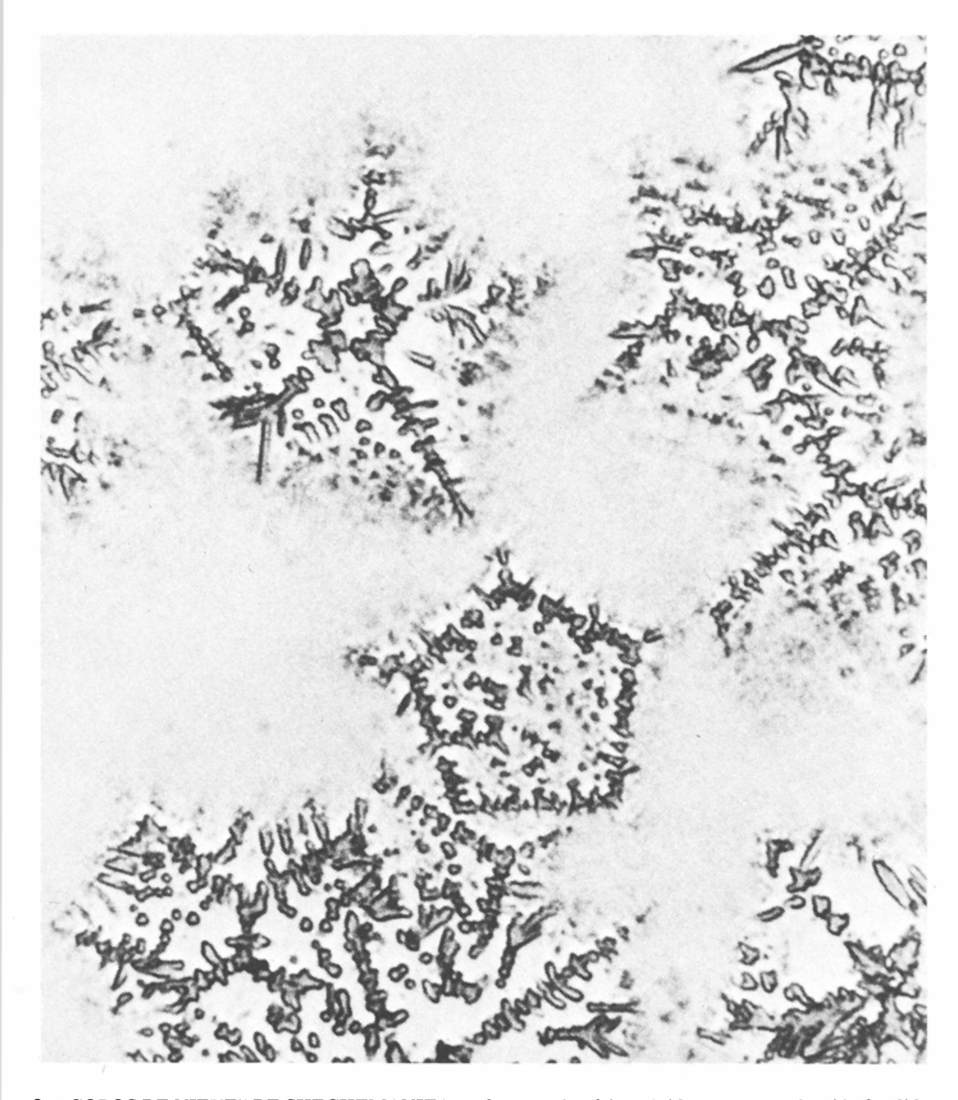
Los embaldosados de Penrose establecen también un puente de unión entre la ordenación cristalina propia de la fase de Frank-Kasper de muchas aleaciones y la ordenación icosaédrica de largo alcance propia de la shechtmanita. En este sentido, Christopher Henley, de la Universidad de Cornell, y Veit Elser, de los Laboratorios AT&T Bell, han demostrado que la celda unitaria de la fase de Frank-Kasper de la aleación $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ se puede considerar como un fragmento ligeramente distorsionado de un embaldosado de Penrose.

En la fase de Frank-Kasper la repetición periódica de este fragmento distorsionado en todo el espacio rompe cualquier simetría icosaédrica. Sin embargo, en la shechtmanita esta región fragmentaria de ordenación icosaédrica se propaga a lo largo del material para formar un cuasicristal macroscópico. Henley y Elser han demostrado también cómo decorar los romboedros de Penrose para explicar la estructura de la fase shechtmanita de la aleación $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$. La ordenación icosaédrica en esta fase es de largo alcance, a pesar de la presencia de una red de líneas de disclinación en cuña similares a las encontradas en las fases de Frank-Kasper.

Se han avanzado propuestas semejantes para describir las aleaciones de aluminio y manganeso descubiertas por Schechtman y sus colegas. Los modelos diseñados incluyen muchos tetraedros y fragmentos de icosaedros; aunque recogen también algunos octaedros. Esos modelos llegan a justificar hasta un 80 por ciento de las posiciones de los átomos en el material en cuestión.

Los embaldosados de Penrose sugieren también la existencia de cristalografías exóticas basadas en simetrías no icosaédricas. Así, Leonid A. Bendersky, del National Bureau of Standards, ha demostrado que otra fase de aluminio-manganeso enfriada rápidamente se comporta como si estuviera compuesta por una serie de capas de embaldosados bidimensionales de Penrose apiladas periódicamente en dirección vertical.

Todavía subsisten muchas preguntas sin respuesta. Por ejemplo, ¿qué relación existe entre la ordenación icosaédrica de corto alcance en líquidos o vidrios metálicos y la ordenación icosaédrica de largo alcance en la shechtmanita? Parece ser mucho más fácil formar fragmentos microscópicos de cristales de shechtmanita en un líquido subenfriado que engendrar los primeros fragmentos microscópicos de un cristal ordinario. Una vez formados estos pequeños fragmentos, deben crecer hasta alcanzar dimensiones macroscópicas. Seguimos sin conocer la forma en que se produce el crecimiento de la



8. "COPOS DE NIEVE" DE SHECHTMANITA: se forman al enfriar rápidamente una aleación fundida de aluminio y magnesio. Los "cristales" presentan una estructura ramificada con dendritas o lóbulos parecida a la que se observa normalmente en los cristales de hielo, pero debido a la subyacente simetría icosaédrica de la shechtmanita, estas muestras manifiestan simetría de quinto orden en lugar de la simetría de sexto orden que caracteriza a los copos de nieve ordinarios. Estas muestras miden unos 10.000 espaciados atómicos y en esta fotografía de microscopía electrónica están aumentadas unas 10.000 veces. La fotografía ha sido realizada en el laboratorio de Leonid A. Bendersky y Robert J. Schaefer.

shechtmanita, aunque está claro que los procesos de este crecimiento deben diferir bastante de los que siguen los cristales ordinarios.

Otra incógnita se refiere a la extensión de la ordenación de traslación y de la ordenación de orientación del material. Aunque las orientaciones de los icosaedros de la shechtmanita están correlacionadas para distancias de hasta miles de espaciados atómicos, los correspondientes planos de la red están en fase para algunos centenares de espaciados. No sabemos si las distancias de correlación pequeñas de la ordenación de traslación son una característica intrínseca de la fase o una consecuencia del proceso de enfriamiento. Tal vez sea posible conseguir en un breve plazo el crecimiento de grandes cristales de shechtmanita bajo condiciones más controladas; estos cristales podrían ayudar a resolver el problema.

Los cuasicristales de shechtmanita no son una simple curiosidad. El estudio de los cuasicristales ha relacionado dos campos teóricos existentes con anterioridad: la teoría de los vidrios metálicos y la teoría matemática de los embaldosados aperiódicos. De este modo se han puesto a punto nuevas y potentes herramientas para el estudio de las aleaciones metálicas. Las cuestiones relacionadas con la ordenación icosaédrica de corto y largo alcance serán objeto de la atención de los físicos especializados en estado sólido y ciencia de los materiales durante algún tiempo.

Transplantes en el sistema nervioso central

Las neuronas embrionarias transplantadas pueden establecer conexiones funcionales en el cerebro y la médula espinal adulta, considerados, durante mucho tiempo, inmutables en mamíferos

Alan Fine

¿Pueden repararse los daños causados al cerebro o a la médula espinal por enfermedades o lesiones? Las neuronas, o células nerviosas, no pueden regenerarse en los mamíferos adultos. La mayoría de ellas ya se han instalado en su lugar al final de la infancia, y en primates –incluido el género humano– el desarrollo del sistema nervioso ha llegado a su término en la pubertad. Los axones, prolongaciones filamentosas de las células nerviosas a través de las cuales se transmiten los mensajes, pueden crecer de nuevo después de sufrir un daño –capacidad a la que se debe la lenta recuperación de la sensibilidad y el movimiento tras ciertas lesiones–, pero esto sólo suele suceder en los nervios periféricos. En el cerebro o en la médula espinal, la vía que se daña difícilmente se recupera.

Aunque el sistema nervioso central de mamíferos (el cerebro y la médula espinal) presenta escasa capacidad de autorregeneración, en la última década se ha descubierto que sí experimenta otras formas de crecimiento. En diferentes ensayos, realizados principalmente con ratas, otros investigadores y yo mismo demostramos que los injertos de tejido cerebral embrionario pueden ser incorporados anatómica y funcionalmente en el sistema nervioso central adulto. Las interacciones entre injertos y sistema nervioso hospedador han proporcionado abundante información de los factores que gobiernan el desarrollo y la regeneración del sistema nervioso central. El éxito conseguido en algunos experimentos de transplante ha sugerido también nuevas vías para tratar enfermedades hasta hoy incurables, como la de Parkinson y la de Alzheimer, en las que degenera parte del sistema nervioso central.

Las investigaciones de la pasada década vinieron precedidas por incontables esfuerzos. En 1890, W. Gilman Thompson, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York, intentó transplantar pedazos de la corteza cerebral de gatos adultos a perros; la corteza es la capa exterior del cerebro. Durante los 15 años siguientes, con estos procedimientos o con manipulaciones similares realizadas por otros científicos, no se consiguió que sobreviviera ninguna neurona. Elizabeth Hopkins Dunn, que trabajaba como ayudante de investigación en la Universidad de Chicago, supuso que, aunque el tejido cerebral adulto no toleraba el rigor de un transplante, el tejido inmaduro sí podría hacerlo. En trabajos realizados en 1903 (pero no publicados hasta 1917) intercambió fragmentos de corteza entre ratas de 10 días. A los tres meses de la intervención, encontró en los injertos neuronas supervivientes en un 10 por ciento de los casos.

Además de establecer que el tejido nervioso inmaduro tenía mejores posibilidades de supervivencia en otro cerebro que el tejido adulto, Dunn observó que en la mayoría de los casos los injertos supervivientes eran los que estaban muy irrigados con nuevos vasos sanguíneos. Estos transplantes habían sido alojados en los ventrículos, o espacios llenos de fluido, del cerebro receptor, en contacto con el plexo de la coroides, la membrana altamente vascularizada que recubre los ventrículos. En 1940, W. E. Le Gros Clark, de la Universidad de Oxford, confirmó la importancia que tenían la inmadurez y el elevado aporte sanguíneo para la supervivencia de las neuronas transplantadas. Implantó con éxito pedazos de corteza de embriones de conejo en ventrículos laterales de conejos de seis semanas de edad. Aunque las neuronas eran inmaduras en el momento del transplante, cuatro semanas más tarde vio que muchas habían completado su desarrollo.

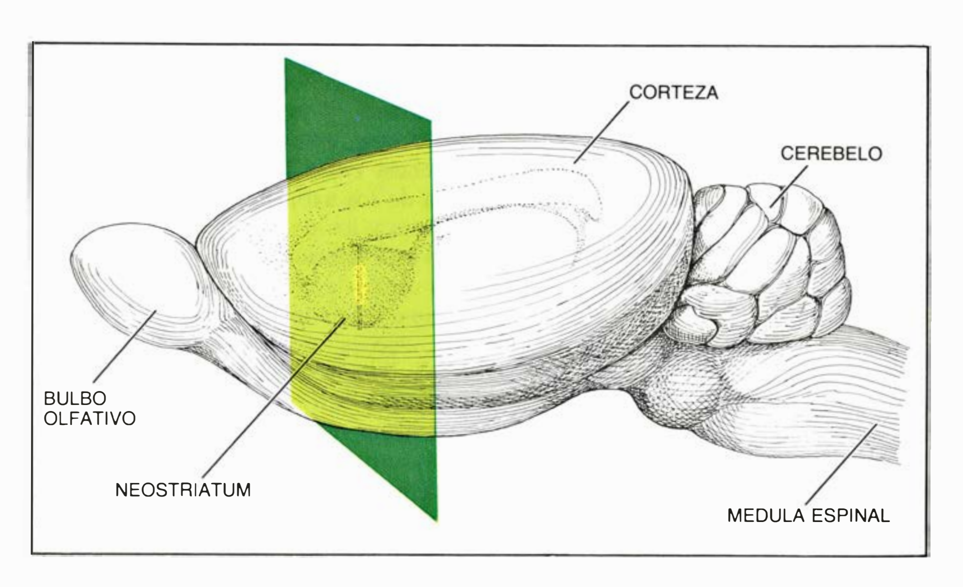
Muchos investigadores no ocultaron su escepticismo ante estos resultados iniciales y los trabajos no se continuaron. El interés actual por el transplante en el sistema nervioso central de mamíferos data de 1971, cuando Gopal D. Das, Joseph Altman y sus alumnos de la Universidad de Purdue demostraron de forma convincente que las neuronas inmaduras transplantadas podían sobrevivir y madurar. Inyectaron timidina (uno de los sillares estructurales del ADN) marcada radiactivamente en ratas de siete días, donde el compuesto se incorporó en el material genético de las células recién originadas, incluidas las neuronas. Más tarde, Das y Altman transplantaron fragmentos de cerebelo de animales inyectados en el sitio correspondiente de animales no tratados; el cerebelo es una estructura enroscada que se aloja detrás del cerebro. Dos semanas más tarde hicieron cortes del cerebelo hospedador y los recubrieron de emulsión fotográfica. La radiactividad de los cortes impresionó la emulsión, señal de que habían sobrevivido las neuronas transplantadas.

Experimentos posteriores de Das y Altman establecieron el principio general de que el tejido cerebral embrionario transplantado tiene las máximas posibilidades de supervivencia durante el período en que las neuronas se multiplican y migran, antes de que extiendan sus dendritas y axones filamentosos. Puesto que las diferentes partes del cerebro se desarrollan a distinta velocidad, la edad óptima del animal donante varía de acuerdo con el tipo de injerto de que se trate. La edad del animal receptor importa menos, para la

supervivencia del tejido transplantado, que factores tales como la estabilidad física del implante y el aporte sanguíneo disponible en el injerto.

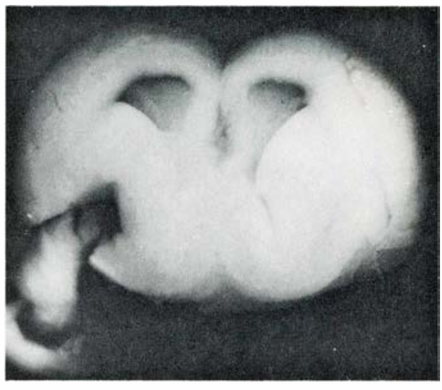
Se sabe ahora que una condición que incide menos en la supervivencia del transplante de lo que inicialmente se esperaba es el grado de parentesco entre el animal donante y el receptor. En otros tipos de injertos se producían rápidamente rechazos inmunológicos si no mediaba una estrecha relación entre el donante y el receptor. Por eso, la mayor parte de los primeros experimentos de transplante se realizaron en animales muy próximos, desde el punto de vista genético, cuando no idénticos. Más tarde, se conoció que el sistema nervioso central podía verse libre del rechazo inmunológico de un injerto, aun cuando el animal donante y el receptor fueran genéticamente distintos. Los transplantes en el sistema nervioso central pueden llevarse a cabo con éxito entre animales de distinta especie, en particular si el animal receptor ha sido tratado con una droga inmunosupresora, por ejemplo ciclosporina.

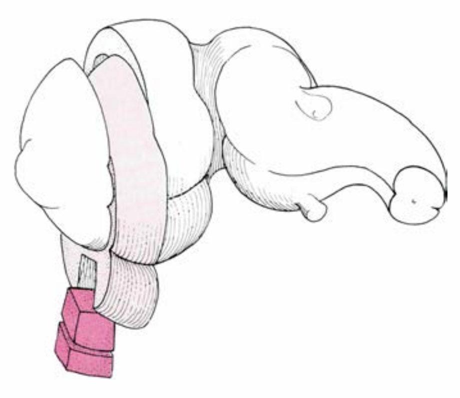
La observación de que el cerebro es un sitio "inmunológicamente privilegiado" para el transplante no se hizo por el injerto de neuronas. Trabajos de primera hora demostraron que los injertos de piel y de tejido tumoral podían sobrevivir en el cerebro, incluso en un animal que rechazaba de inmediato injertos similares en su piel. Se cree que, en el cerebro, el acceso del sistema inmune a los tejidos extraños es limitado; por una doble razón: el cerebro carece de vasos y nódulos linfáticos, a partir de los que fluyen muchas células del sistema inmune, y las paredes de los vasos sanguíneos del sistema nervioso central están especializadas en crear una "barrera hematoencefálica".



1. LA FLUORESCENCIA AMARILLA de la fotografía superior señala las células nerviosas transplantadas en un cerebro de rata. Para provocar en el animal un símil de la enfermedad de Parkinson, se han eliminado previamente del neostriatum las fibras nerviosas que contienen el neurotransmisor dopamina; el neostriatum es la estructura cerebral que aquí se muestra. Las neuronas que sintetizan dopamina se extrajeron más tarde de un embrión de rata y se inyectaron en el neostriatum en forma de células sueltas. A los seis meses, se realizó un corte en el cerebro hospedador a lo largo del plano indicado en el diagrama de la derecha. El corte se trató con vapor de formaldehído, que se combina con la dopamina para producir un compuesto fluorescente. La fluorescencia del implante y alrededores indica que las neuronas transplantadas han sobrevivido, han emitido fibras al neostriatum y han continuado fabricando dopamina. Esta imagen procede de Anders Björklund, de la Universidad de Lund.







2. CEREBRO EMBRIONARIO DE RATA (*fotografía superior*), visto desde debajo; constituye la fuente habitual de neuronas para el transplante en ratas adultas. El cerebro, de cuatro milímetros de espesor, procede de un embrión de 17 días (las crías de rata nacen a los 22 días). En este estadio de desarrollo, las neuronas todavía conservan la capacidad de multiplicarse y migrar dentro del cerebro. En muchas zonas no han crecido aún axones y dendritas, prolongaciones a través de las cuales se comunicarán con otras células y tejidos. Cuando estas neuronas se transplantan en un cerebro adulto pueden madurar y emitir axones en el tejido hospedador. La parte interior del tejido disecado de un corte de cerebro embrionario (*izquierda*) contiene células que son precursoras de una estructura conocida por nucleus basalis. Estas células, implantadas en el cerebro de una rata adulta, pueden revertir el curso de un defecto que simula una característica de la enfermedad de Alzheimer. El diagrama (*derecha*) indica la orientación del corte en el cerebro intacto.

La falta de rechazo en los transplantes neuronales puede también reflejar las características idóneas que presentan las células nerviosas. Muchas células llevan en su superficie ciertas macromoléculas denominadas antígenos principales de histocompatibilidad de clase I. Distintos en cada animal, los antígenos son moléculas que el sistema inmune reconoce como extrañas cuando rechaza el tejido injertado. Sabemos ya que en muchas neuronas estos antígenos no suelen abundar o faltan incluso.

La habitual supervivencia del tejido nervioso transplantado abre el camino para el estudio de su interacción con el receptor. Una de las líneas de investigación que ha aplicado esta técnica es la seguida en la identificación de los factores que controlan la respuesta del sistema nervioso central a las lesiones. Los transplantes sirven para alterar las condiciones que registran en el cerebro o médula espinal traumatizados, permitiendo así estimar la relación entre un factor dado y la limitada capacidad regenerativa de las neuronas centrales.

Se sabe, en este contexto, que la diferencia entre la capacidad regenerativa de los axones de los nervios periféricos y los del sistema nervioso central está relacionada con diferencias en sus células de la glía. Estas células rodean a los axones y pueden mielinizarlos, esto es, recubrir las fibras con una vaina de material lipídico que actúa de aislante eléctrico. Los nervios periféricos están mielinizados por células de Schwann; las células mielinizadoras del cerebro y la médula espinal son oligodendrocitos.

Estudios realizados con neuronas sensitivas, que tienen a la vez una fibra central y una periférica, sugieren que las células de la glía influyen en la regeneración. Desde un punto inmediatamente exterior a la médula espinal, una célula nerviosa sensitiva extiende una fibra hacia una estructura sensorial de la periferia del cuerpo y otra hacia el interior de la médula espinal. La fibra periférica, que está mielinizada únicamente por células de Schwann, se regenera después de la lesión. El gran neuroanatomista español Santiago Ramón y Cajal observó, hace 60 años, que si se lesiona la fibra central, ésta vuelve a crecer sólo hasta el punto en que penetra en la médula espinal y los oligodendrocitos sustituyen a las células de Schwann.

Varios investigadores han propuesto que los oligodendrocitos secretan una sustancia que inhibe el crecimiento del axón, o que las células de Schwann estimulan el crecimiento de los axones. Ya se han identificado varios mecanismos por los que las células de Schwann promoverían el crecimiento de las fibras. Para inducir el crecimiento de los axones y su adherencia a la superficie secretan proteínas como la laminina, cuya presencia ha sido detectada en cultivos. En respuesta a lesiones de los nervios periféricos, las células de Schwann pueden también producir el factor de crecimiento del nervio, sustancia ésta muy estudiada que facilita la supervivencia y el crecimiento fibrilar en algunas células nerviosas periféricas.

En 1977, Carl C. Kao y sus colaboradores, de la Universidad de Georgetown, comprobaron la posibilidad de que la glía periférica pudiera llevar a cabo la regeneración de fibras sistema nervioso central dañadas. Estos investigadores emplearon complicadas técnicas quirúrgicas para unir segmentos de nervio ciático (uno de los principales nervios periféricos) en cavidades efectuadas al quitar pedazos de la médula espinal de ratas. Al cabo de unas semanas, encontraron que habían sanado el injerto y la médula espinal formando una unión lisa, sin cicatriz, y que parecía que algunas fibras habían crecido de la médula espinal al segmento de nervio periférico.

Albert J. Aguayo, Peter M. Richardson y sus colegas, del Hospital General de Montreal y la Universidad de McGill, han confirmado y ampliado estos hallazgos. Un mes después de sustituir pedazos de médula espinal por segmentos de nervio ciático de la

misma rata, examinaron la médula espinal por microscopía óptica y electrónica y observaron que en los injertos crecían numerosas fibras. A los tres meses, estos investigadores demostraron, al inyectar en la médula espinal adyacente al injerto pequeñas cantidades de la enzima peroxidasa de rábano, que algunas de las fibras en regeneración habían conseguido atravesar el injerto, uniendo ambos extremos cortados de la médula.

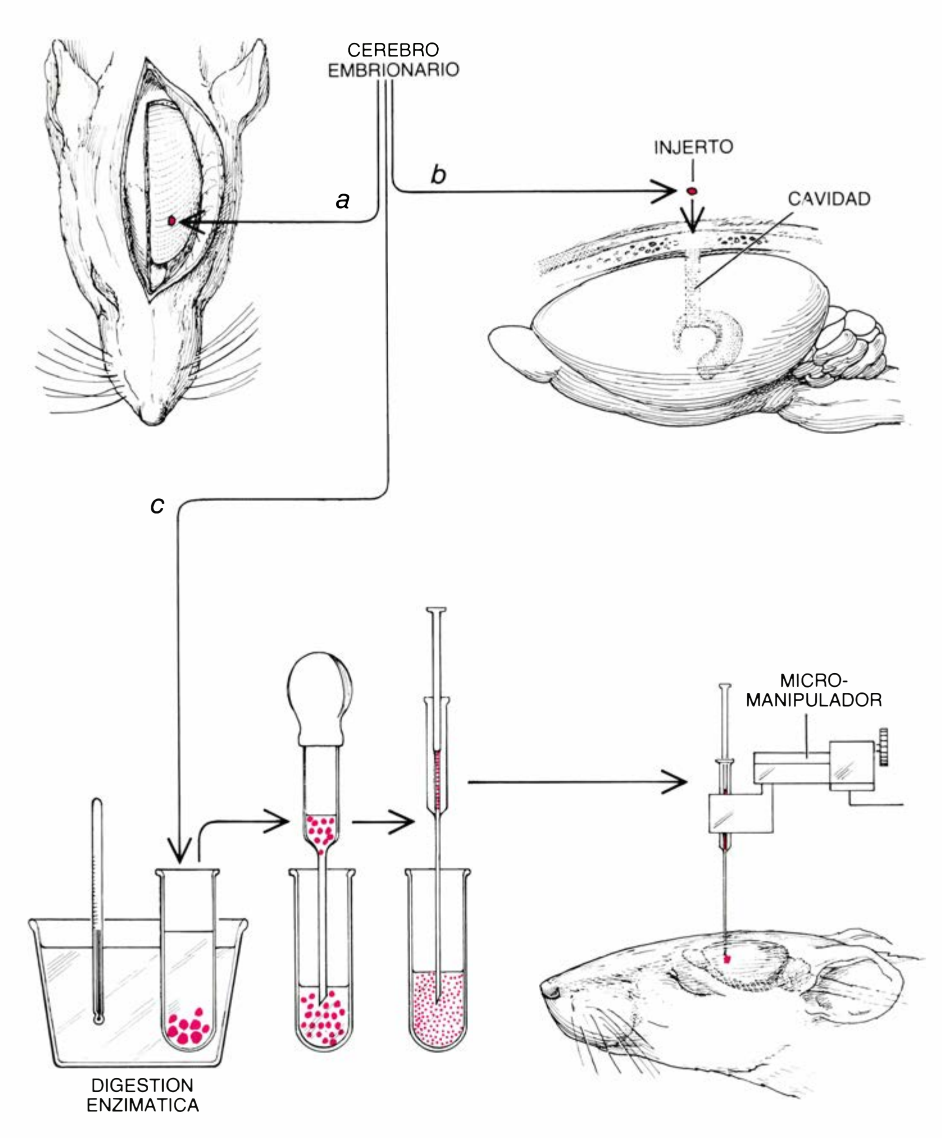
Absorbida por las terminales del nervio, la peroxidasa llega a los cuerpos celulares a través de los axones. La incubación en una disolución, que puede ser alterada químicamente por la enzima, tiñe los cuerpos celulares cuyos axones la han transportado. En las ratas injertadas, la tinción aparecía en las neuronas espinales, al otro lado del injerto desde el lugar de la inyección; sus fibras habían crecido a través del segmento de nervio periférico. En trabajos posteriores, Aguayo y sus colegas encontraron que, aunque las fibras en regeneración podían atravesar injertos de varios centímetros de longitud, sólo penetraban en la médula espinal, allende el injerto, unos pocos milímetros como máximo.

Los experimentos de transplante nos ayudan, pues, a desentrañar diferentes capacidades regenerativas de los sistemas nerviosos periférico y central. Un contraste similar en la capacidad para regenerarse y restablecer conexiones se da entre el cerebro embrionario (que sufre importantes cambios a lo largo del desarrollo y, frecuentemente, puede recuperarse de las lesiones) y el cerebro adulto. Anders Björklund y Ulf Stenevi, de la Universidad de Lund, y Lawrence F. Kromer, entonces en el Hospital Clínico de la Universidad de California en San Diego, identificaron una posible causa de estas diferencias al transplantar trozos de cerebro embrionario de rata en cerebros adultos lesionados.

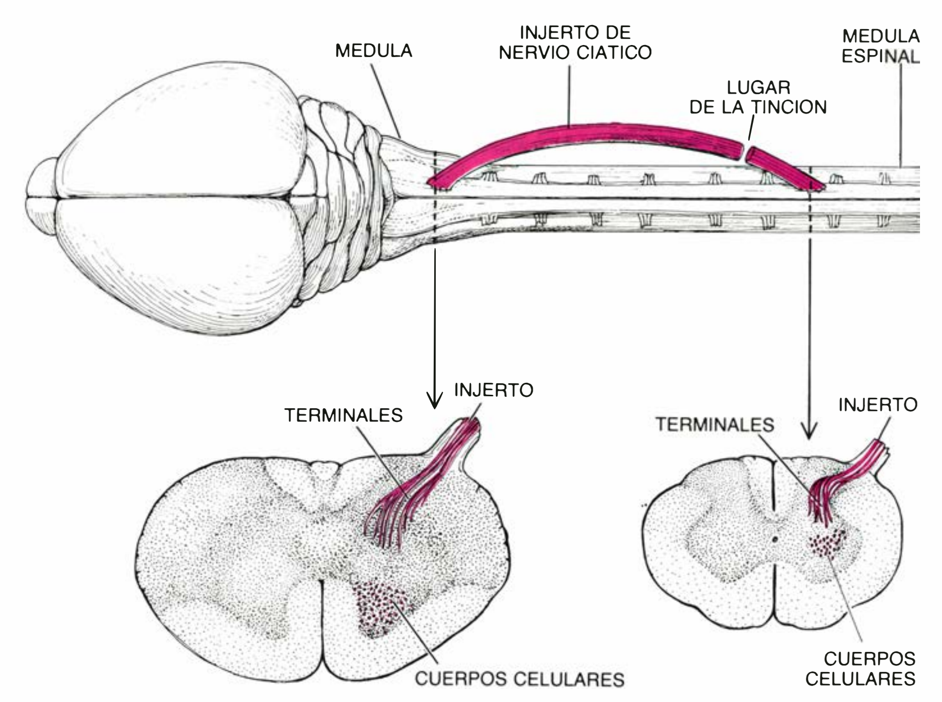
Antes de realizar los transplantes, seccionaron una banda de fibras nerviosas (la fimbria) a su entrada en el hipocampo; constituye éste una hoja curvada y plegada de la evolutivamente ancestral corteza, que en los humanos interviene en las emociones y la memoria. La fimbria comprende fibras procedentes de dos estructuras de la parte anterior del cerebro, el núcleo septal de la zona media y el núcleo de la banda diagonal. Estas fibras contienen el neurotransmisor acetilcolina, uno de los mensajeros químicos del cerebro. Al seccionar la fimbria, se elimina permanentemente de la mayor partedel hipocampo superior la acetilcolina y la enzima que la sintetiza, la colina acetiltransferasa.

Cuando los investigadores transplantaron un pedazo de hipocampo embrionario de rata en una cavidad de la fimbria, las fibras colinérgicas (liberadoras de acetilcolina) crecían a través del injerto y en el interior del hipocampo hospedador. Seis meses después, se restablecía al 50 por ciento de su nivel normal la colina acetiltransferasa en el hipocampo adyacente al injerto. Experimentos similares con otras partes del cerebro embrionario han demostrado que el tejido embrionario actúa como mediador en el crecimiento de axones del sistema nervioso central, dado que el tejido injertado es el objetivo normal de los axones. Los resultados sugieren que las estructuras cerebrales embrionarias podrían producir factores neurotróficos específicos (sustancias que estimulan el crecimiento de células y fibras nerviosas) que guían a las fibras en crecimiento hacia sus objetivos. O bien, que el tejido embrionario injertado inste al cerebro hospedador a producir dichos factores.

Gracias a las observaciones realizadas en 1982 por Ellen R. Lewis y Carl W. Cotman, de la Universidad de California en Irvine, sabemos que el cerebro adulto puede, en determinadas



3. MODALIDAD DE TRANSPLANTE: varía de acuerdo con la finalidad de la investigación. El tejido disecado de la parte adecuada del cerebro embrionario de rata puede implantarse directamente en el cerebro hospedador (*a*). Otra opción: abrir con antelación una cavidad (*b*); los vasos sanguíneos crecen en las paredes de la cavidad y aseguran al injerto un abundante aporte sanguíneo. Cuando el tejido embrionario se implanta con su organización interna intacta se puede estudiar el crecimiento de las fibras del cerebro hospedador en el injerto. Una tercera posibilidad (*c*) destruye menos al cerebro hospedador. El tejido embrionario es digerido enzimáticamente y luego pasado, para su ruptura, a través de una serie de pipetas cada vez más finas. Se obtiene así una suspensión de células aisladas; éstas pueden marcarse con una sustancia radiactiva o con un colorante, o almacenarse y manipularse de distintas maneras antes de inyectarlas con precisión en algún sitio del cerebro de rata hospedador. Los transplantes suelen efectuarse entre ejemplares emparentados.



4. PUENTE DE NERVIO PERIFERICO, injertado en el sistema nervioso central de rata por Albert J. Aguayo y Samuel David, de la Universidad canadiense de McGill, para estudiar el efecto del nervio en el crecimiento del axón. Estos investigadores insertaron uno de los extremos de un segmento de nervio ciático (uno de los nervios principales de la pierna) en la médula (una parte del tronco cerebral) y el otro extremo en la médula espinal. Después de permanecer el injerto durante seis meses en su alojamiento, lo seccionaron, tiñeron sus superficies cortadas con la enzima peroxidasa de rábano y posteriormente examinaron cortes transversales de la médula y de la médula espinal realizados en ambos extremos del injerto. Los cortes de estos extremos presentaban cuerpos celulares teñidos; los cortes también presentaban fibras teñidas que se dirigían desde el segmento del nervio hacia el interior del tejido hospedador adyacente. Evidentemente, las neuronas de la médula y de la médula espinal habían emitido fibras a lo largo del injerto de nervio ciático; las fibras habían transportado el colorante en ambas direcciones, hacia sus terminales y a sus cuerpos celulares. Se cree que la glía, o células de soporte, de los nervios periféricos favorecen el crecimiento del axón.

condiciones, secretar factores neurotróficos. Vieron que el tejido cerebral embrionario, transplantado en cavidades preparadas para ello en el cerebro de ratas adultas, sobrevivía mejor en las cavidades hechas de 3 a 6 días antes de la implantación que en otras abiertas antes o después. Los investigadores sospecharon que durante ese intervalo de tiempo se alcanzaba la máxima concentración de algún factor neurotrófico producido o acumulado por el sistema nervioso central después de una lesión.

Junto con Manuel Nieto-Sampedro y otros colegas, los neurólogos de Irvine demostraron la presencia de ese factor, una vez extraído el fluido de las cavidades y agregado a cultivos de neuronas. El fluido aumentaba la supervivencia de las neuronas, y el efecto era mayor si la cavidad se había realizado de 3 a 6 días antes. Este factor actuaría como un análogo del factor de crecimiento del nervio y estimularía el limitado crecimiento fibrilar observado después de ciertas lesiones del sistema nervioso central.

Además de revelar algunas influencias sobre el alcance global del crecimiento fibrilar, el destino de los transplantes nerviosos apunta a los factores que controlan el establecimiento de modelos específicos para las conexiones cerebrales. Las neuronas embrionarias injertadas pueden normalmente extender fibras hasta el interior del cerebro hospedador, en contra de la habitual incapacidad de las neuronas adultas para originar nuevas fibras o regenerar las lesiones. No se trata de un crecimiento indiscriminado. En la cuantía y pauta de crecimiento fibrilar influyen, a la vez, la relación anatómica normal entre el injerto y el tejido hospedador y la inervación existente en las estructuras hospedadoras.

Las fibras que se extienden desde el tejido injertado crecen con más facilidad en las estructuras habitualmente inervadas por ese mismo tejido. Björklund, Stenevi y sus colaboradores transplantaron neuronas embrionarias en la corteza de ratas adultas y también en el neostriatum, una región ubicada debajo de la corteza del cerebro anterior, que está relacionada con el movimiento. Las neuronas se tomaron de la substantia nigra, una estructura del cerebro medio que emite numerosas fibras (que contienen el neurotransmisor dopamina) al neostriatum, pero muy pocas a la corteza. Las células sobrevivían en ambos sitios, pero sólo emitían un número de fibras apreciable al neostriatum, su principal objetivo.

Raymond D. Lund, entonces en la Universidad Médica de Carolina del Sur, y sus alumnos C. B. Jaeger, Steven C. Jaeger y Linda Kirschen McLoon realizaron detalladas observaciones sobre la especificidad con la que los injertos interactúan con los cerebros hospedadores.

Para ello transplantaron retina embrionaria en cerebros de ratas recién nacidas y adultas. Unas veces, el injerto se alojó en el colículo superior, región del cerebro cuyas neuronas retinales emiten habitualmente fibras; en otras ocasiones lo fue en la corteza o en el cerebelo, zonas que no reciben fibras de la retina. Aunque las retinas sobrevivían en ambos sitios, sólo se daba crecimiento fibrilar en el colículo superior. Las fibras en crecimiento alcanzaban en el colículo los objetivos habituales de las fibras retinales y a veces también seguían los caminos retinales normales hasta objetivos más alejados.

Además de emitir fibras, el tejido transplantado en cerebros de ratas recién nacidas recibía en algunos casos fibras del cerebro hospedador; una vez más, la interacción era muy específica. Los injertos de retina, que normalmente no está inervada por otras estructuras cerebrales, no conocían el crecimiento fibrilar del cerebro hospedador. Sin embargo, porciones de colículo embrionario alojados en el colículo superior de ratas recién nacidas, no sólo emitían fibras por sí solos, sino que llegaban a enhebrarse con fibras adecuadas de la retina y corteza hospedadoras. Estos resultados sugieren la existencia de señales locales que controlan el crecimiento fibrilar en el sistema nervioso central.

El descubrimiento de que los injertos extienden el mayor número de fibras hacia las zonas del cerebro hospedador que han sido privadas de su inervación normal corrobora la idea de la presencia de las influencias locales específicas para el crecimiento fibrilar. En el trabajo de Lund y sus colegas, por ejemplo, los injertos de retina promovían el crecimiento fibrilar con más profusión si el ojo, que enviaba normalmente fibras al sitio del transplante, había sido antes extirpado quirúrgicamente. Björklund, Stenevi y sus colaboradores realizaron observaciones similares cuando implantaron tejido embrionario que contenía el locus ceru-

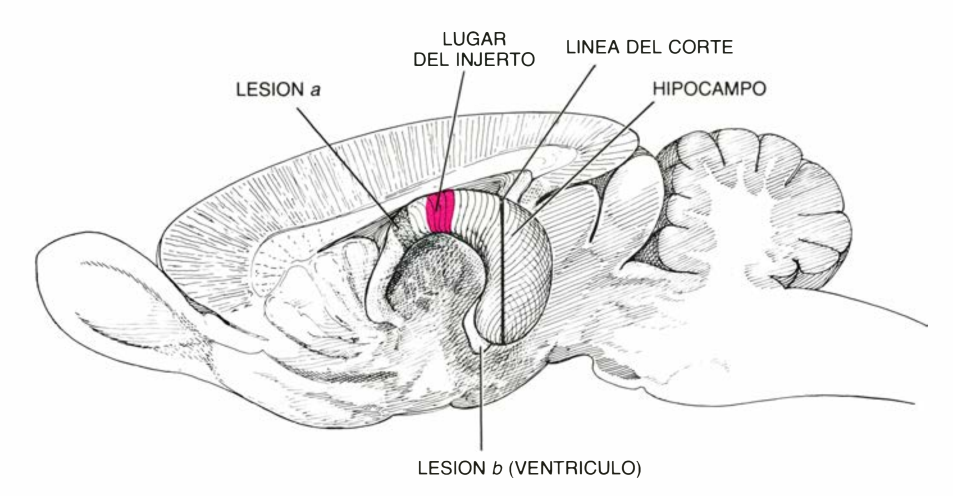
leus; es éste un conjunto de células del tronco cerebral que, para alcanzar todo el cerebro –incluido el hipocampo–, emite fibras que contienen el neurotransmisor noradrenalina. Tras la implantación de tejido en el hipocampo de cerebros adultos, aquél emitía fibras que recordaban el modelo de inervación que habitualmente establecía allí el propio locus ceruleus del cerebro hospedador; ahora bien, esto sólo sucedía si las vías del locus ceruleus se habían destruido antes del transplante.

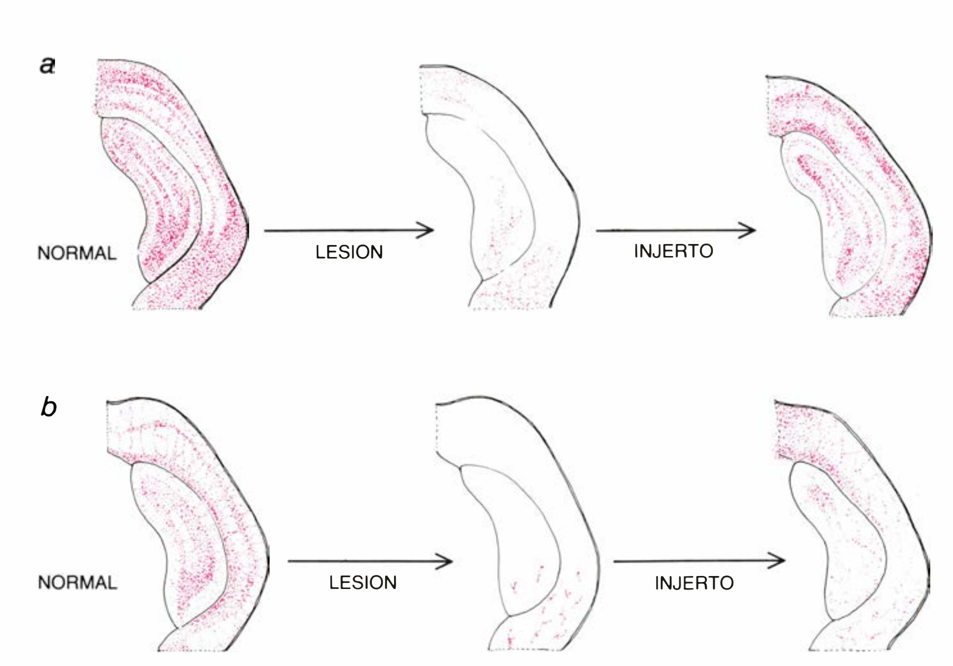
Investigaciones no relacionadas con transplantes han demostrado que el daño a un conjunto de fibras del sistema nervioso central puede originar el "rebrote de axones colaterales": fibras sanas emiten nuevas ramificaciones en la zona denervada. El desorbitado crecimiento fibrilar de los injertos en las estructuras cerebrales denervadas constituye un caso semejante. Tomadas en su conjunto, estas observaciones sugieren que el crecimiento de fibras nerviosas de estructuras cerebrales en desarrollo, al igual que en injertos, puede estar regulado por competencia de algún material poco difusible liberado por las neuronas blanco o estarlo por la ocupación de determinados puntos del blanco.

Los estudios del crecimiento fibrilar confirman que el tejido embrionario injertado se incorpora anatómicamente en el sistema nervioso central hospedador. ¿También se integra funcionalmente? En caso afirmativo, ¿pueden los injertos restaurar la función normal de un cerebro lastimado por lesiones o enfermedades?

Varias características del sistema nervioso central podrían facilitar la recuparación a través de injertos. La recuperación funcional en el sistema nervioso central no requiere la reconstrucción precisa de los elementos dañados. De numerosas funciones importantes y complejas del cerebro y la médula espinal se responsabilizan, de modo semiautónomo, estructuras discretas o conjuntos de neuronas. Para restablecer una función después de una lesión que aísla tal estructura bastaría con sustituir unas pocas células nerviosas de la misma.

Durante los últimos 15 años, los investigadores han establecido que los elementos básicos de la locomoción, como son las ondulaciones rítmicas de la columna vertebral de los peces o las contracciones secuenciales de los músculos de las extremidades responsables de la locomoción de los mamíferos, son producidos por grupos de neuronas de la médula espinal. Estos "generadores de locomoción" están sujetos a diferentes tipos de control: son inhibidos por otras neuronas de la médula, que a su vez están inhibidas por fibras que descienden del tronco cerebral y que liberan, así se cree, catecolaminas neurotransmisoras, como noradrenalina y dopamina. Al seccionar la conexión entre el tronco cerebral y la médula espinal de un gato se da rienda suelta a las neuronas inhibidoras de la médula y, por tanto, se paraliza al animal, pero éste volverá a andar si se le inyecta L-dopa, un precursor de la dopamina, y se le apoya en un molino de ruedas de escalones. A raíz de estas observaciones se ha pensado que la parálisis provocada por las lesiones de la médula espinal podría responder a injertos de neuronas embrionarias productoras de catecolaminas en la médula espinal cerca de los generadores de locomoción; y ello, aun cuando las vías espinales no estén reparadas.

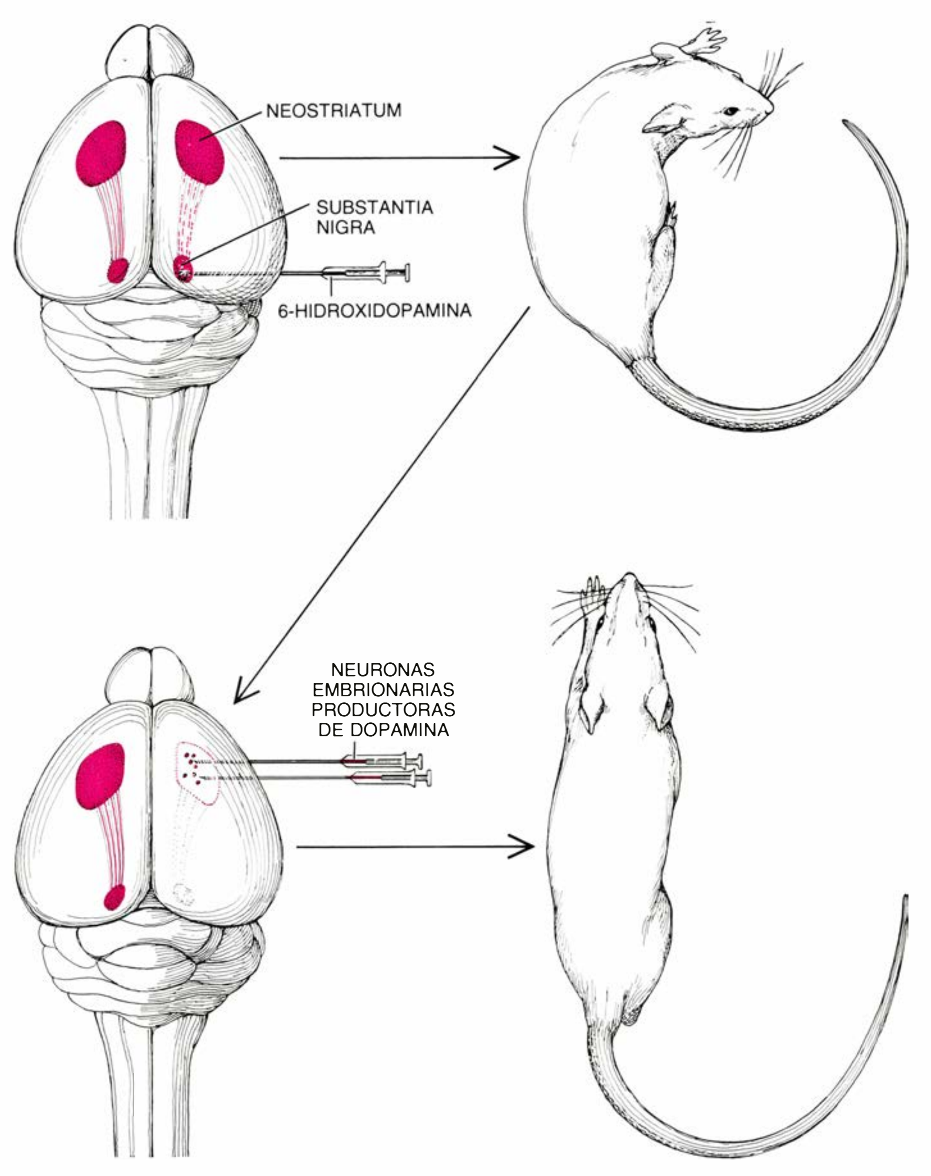




5. RESTABLECIMIENTO DE LA INERVACION NORMAL, después de un transplante de tejido embrionario, efectuado por Anders Björklund y Ulf Stenevi, en el hipocampo denervado de rata; se hace evidente en cortes transversales tratados para distinguir las fibras que contienen tipos particulares de neurotransmisores. El diagrama (*arriba*) indica la orientación de los cortes y los lugares en que se realizaron las manipulaciones experimentales. Las series de cortes superiores fueron expuestas a una sustancia que revela la distribución de la acetilcolina antes (*izquierda*) y después (*centro*) de seccionar (*lesión* a) el haz de fibras colinérgicas (que contienen acetilcolina) que se introduce en el hipocampo. Cuatro meses más tarde se implantaron neuronas colinérgicas de un embrión en un hipocampo denervado; un tercer corte (*derecha*) muestra que las células injertadas han emitido filamentos que recuerdan el modelo normal de inervación colinérgica. Las series de cortes inferiores ilustran el modelo normal de las fibras que contienen noradrenalina (*izquierda*) y su eliminación (*centro*) después de la inyección, en el ventrículo adyacente, de una toxina que destruye específicamente estas fibras (*lesión* b). Seis meses después de la implantación del tejido embrionario, que contenía noradrenalina, se había restablecido en buena medida el modelo de inervación (*derecha*).

La médula espinal no consta sólamente de largas vías formadas por una única fibra continua, sino que las vías también están constituidas por múltiples eslabones cortos, en los que los mensajes son transmitidos por conjuntos de neuronas. Por tanto, se puede suponer que en una médula espinal seccionada estas vías transmisoras múltiples pueden al menos repararse con transplantes de neuronas embrionarias, que transmitirían información a través de los intervalos entre vías.

Tanto los factores neuroquímicos como los neuroanatómicos son esperanzadores para la recuperación funcional a través de injertos. La química del cerebro cambia después que éste sufra una lesión. Estos efectos han sido estudiados detalladamente en un símil experimental de la enfermedad de Parkinson. Esta enfermedad resulta de la degeneración de las fibras nerviosas liberadoras de dopamina, que se extienden desde la substantia nigra hasta el neostriatum. La degeneración puede inducirse en el cerebro de rata inyectando, en ambos lóbulos o en el haz de fibras, 6-hidroxidopamina, sustancia que destruye selectivamente las neuronas, fibras y terminales que contienen catecolaminas (dopamina, por ejemplo).



6. ENFERMEDAD DE PARKINSON EXPERIMENTAL, inducida en ratas; la misma puede revertirse con transplantes de neuronas productoras de dopamina. Una inyección de la toxina 6-hidroxidopamina destruye la substantia nigra, que emite al neostriatum fibras portadoras de dopamina. Las inyecciones a ambos lados debilitan fuertemente al animal; pero si sólo se le inyectaba en un lado, la rata desarrolla asimetría de postura y movimiento: se encorva espontáneamente hacia el lado de inyección. William J. Freed, Richard Jed Wyatt y sus colaboradores del Instituto Nacional de Salud Mental, e independientemente Björklund, Stenevi y sus colegas, han encontrado que el transplante de neuronas productores de dopamina, tomadas de embriones de rata, en el neostriatum denervado elimina la asimetría de movimiento durante al menos seis meses.

Cuando se destruyen las vías de la dopamina en ambos lados cerebrales, el animal se inmoviliza y puede llegar a morir si no se le administra cuidados intensivos. Una rata inyectada en un solo lado no vuelve a responder a las sensaciones del lado contrario del cuerpo, que está controlado por la mitad del cerebro lesionada. Se desarrolla una postura asimétrica, un retorcimiento corporal hacia el lado que no responde. Cuando el animal se mueve, gira hacia su lado "bueno": el que recibió la inyección.

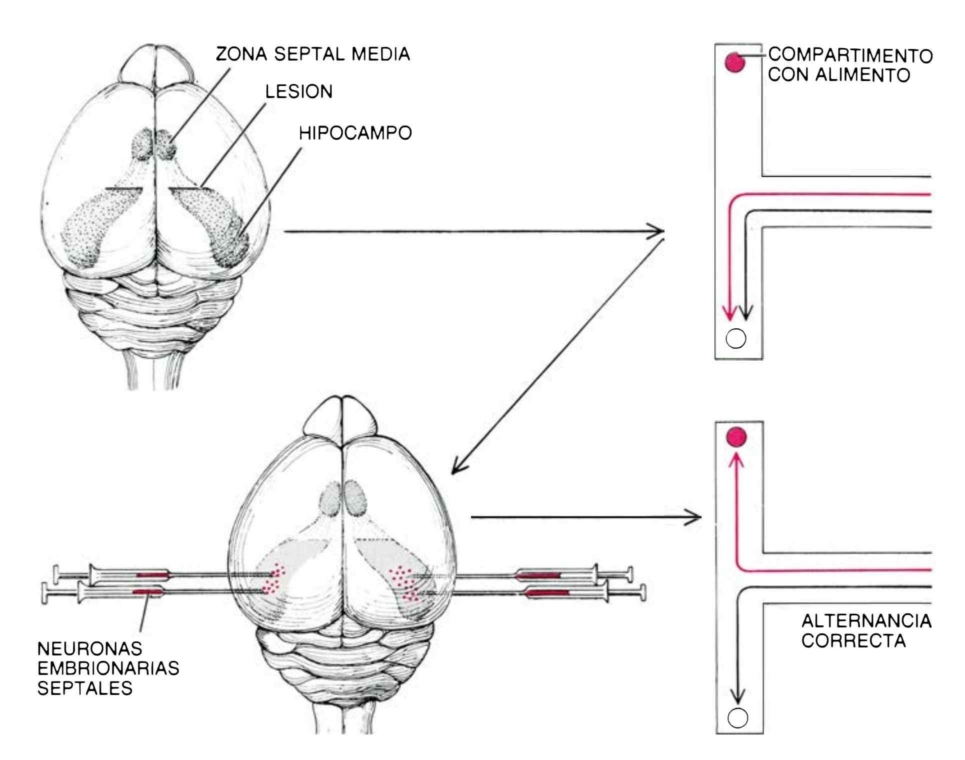
El animal puede recuperarse si las lesiones (las zonas dañadas) no superan más del 5 por ciento de las células o fibras que contienen dopamina. La mayor parte de la recuperación transcurre al cabo de una o dos semanas, demasiado pronto para ser el resultado de la regeneración de las fibras dañadas o la producción colateral de otras neuronas dopaminérgicas. Mediante experimentos realizados en varios laboratorios, principalmente en el de John F. Marshall, de la Universidad de California en Irvine, se han identificado hasta la fecha dos tipos de cambios neuroquímicos que se producen en el sistema nervioso después de una lesión o daño y que pueden intervenir en la rápida recuperación.

Uno de ellos es el aumento de velocidad a la que las fibras terminales supervivientes sintetizan y liberan el neurotransmisor. El otro cambio es el aumento de sensibilidad de las neuronas blanco a las pequeñas cantidades de transmisores que todavía se secretan. Esta "hipersensibilidad por denervación", que normalmente procede de un aumento de la superficie de la célula blanco para el neurotransmisor, aumentaría la eficacia de las fibras dopaminérgicas supervivientes en las ratas lesionadas.

La hipersensibilidad por denervación se debe, probablemente, a alguna de las notables capacidades que presentan los transplantes de neuronas embrionarias para invertir el curso de comportamientos anormales (revertir en lenguaje técnico) en modelos animales de enfermedades por degeneración neurológica. El modelo de la enfermedad de Parkinson de la 6-hidroxidopamina constituyó el primer ejemplo. Mark J. Perlow, William J. Freed y Richard Jed Wyatt, del Instituto Nacional de Salud Mental, trabajando con Lars Olson y Ake Seiger, del Instituto Carolino, y Barry Hoffer, del Centro de Ciencias de la Salud de la Univer-

sidad de Colorado en Denver, destruyeron la substantia nigra de un lado del cerebro de ratas. Luego, transplantaron fragmentos de cerebro embrionario, que contenía las células precursoras de la substantia nigra, en el ventrículo lateral del neostriatum denervado.

Las asimetrías de movimiento resultantes de las lesiones se redujeron después de los injertos. Inyecciones de la droga apomorfina confirmaron que las neuronas transplantadas estaban liberando dopamina. La apomorfina se une a los receptores de la dopamina y los activa. Su efecto proporciona cierta hipersensibilidad de denervación: las neuronas que han perdido su habitual dosis de dopamina se harán anormalmente sensibles a la apomorfina. Así, inyectándola en el neostriatum de una rata lesionada, provoca que en ésta reviertan los giros y retorcimientos producto de la lesión: el neostriatum del lado dañado reacciona desproporcionalmente a la droga. El injerto restablecía parcialmente el aporte de dopamina al neostriatum; en virtud de ello, la respuesta de las ratas injertadas a la apomorfina era sólo la mitad de la respuesta mostrada por las ratas lesionadas que no habían recibido injertos, y la reducción se mantuvo durante todo el tiempo del experimento: más de seis meses.



7. CARACTERISTICA DE LA ENFERMEDAD DE ALZHEIMER, la pérdida de acetilcolina del hipocampo puede simularse en la rata seccionando las fibras colinérgicas que van desde la zona septal media hasta el hipocampo. Mientras que las ratas normales pueden ser entrenadas, con recompensas de alimento, para entrar con rigurosa alternancia en los brazos opuestos de un laberinto en forma de T, las ratas con fibras seccionadas no aprenden a alternar su camino. En cada serie de pruebas entran repetidamente en el mismo lado del laberinto. Björklund y sus colegas descubrieron que las ratas podían nuevamente aprender a alternar ambos lados si se les inyectaba en el hipocampo neuronas embrionarias de la zona septal media.

Freed y Wyatt han encontrado que los implantes de células de la glándula suprarrenal, una estructura que secreta hormonas, pueden también revertir alguno de los efectos de la inyección de 6-hidroxidopamina. Las células, tomadas de la médula, o parte central de la glándula, producen normalmente adrenalina, una hormona derivada de la dopamina. Cuando se eliminan células medulares de la glándula, éstas pueden, en cambio, secretar dopamina. Al igual que en los transplantes neuronales, se implantaron las células en el ventrículo lateral y redujeron la asimetría del movimiento de las ratas, pero no las anomalías de la sensación. Los injertos de substantia nigra embrionaria en el interior del neostriatum, o cerca del mismo, realizados por Björklund y Stenevi, en colaboración con Susan D. Iversen y Stephen B. Dunnett, de la Universidad de Cambridge, reducían o eliminaban el trastorno motor de las ratas y, a la vez, eliminaban completamente la asimetría sensitiva de los animales.

Los modelos experimentales de la enfermedad de Alzheimer ofrecen otro ejemplo interesante de recuperación instada por los transplantes. La pérdida progresiva de la memoria y de otras importantes funciones mentales que acompañan a la enfermedad de Alzheimer están asociadas con la degeneración generalizada de las neuronas y con anormalidades neuroquímicas, fundamentalmente el agotamiento de la acetilcolina en el hipocampo y en la mayor parte de la corteza. Al seccionar la fimbria y privar al hipocampo de rata de su principal suministro de acetilcolina, se dificultan determinados tipos de aprendizaje, en particular el de tipo espacial que se necesita para aprender un laberinto.

Björklund y sus colaboradores, entre los que se contaba Fred H. Gage, transplantaron pedazos de tejido de las estructuras del cerebro anterior, que aportan acetilcolina al hipocampo, en la fimbria seccionada de rata; los investigadores introdujeron el tejido, en forma de células disgregadas, en el hipocampo denervado de otras ratas. Los injertos mejoraron la capacidad de los animales para conocer el laberinto –un efecto que era más evidente si los animales habían sido además inyectados con fisostigmina; esta droga bloquea la degradación de la acetilcolina y, por tanto, aumenta sus efectos.

La corteza cerebral, que también se ve afectada en la enfermedad de Alzheimer, obtiene su aporte de acetilcolina del nucleus basalis de Meynert, un conjunto de células ubicadas en la base del cerebro anterior. Estas células degeneran en la enfermedad de Alzheimer. Para simular esta característica de la enfermedad, Dunnett, Guy Toniolo, de la Universidad de Estrasburgo, y otros colegas, así como yo mismo, inyectamos la toxina ácido iboténico en la región del nucleus basalis de uno de los lados del cerebro de rata. Esta toxina, que destruye las neuronas respetando las fibras nerviosas que atraviesan la zona inyectada, elimina en el lado inyectado casi todo el aporte de acetilcolina del nucleus basalis a la corteza.

Como resultado de la inyección del fármaco aparecen ciertas asimetrías de carácter sensitivo y motor, junto con importantes disminuciones en la capacidad de las ratas para aprender y recordar tareas sencillas, tales como evitar el compartimento oscuro de un laberinto bicameral o encontrar una plataforma sumergida en un recipiente con agua.

Debido a que las neuronas del nucleus basalis están esparcidas entre otras estructuras cerebrales, el ácido

iboténico destruye inevitablemente un conjunto de células que emite fibras a partes del cerebro distintas de la corteza. Por tanto, no está claro si las anormalidades de comportamiento de las ratas inyectadas proceden sólo de la destrucción de las vías colinérgicas desde el nucleus basalis hasta la corteza o también reflejan el daño de otras vías. Pensamos que la capacidad de los transplantes de nucleus basalis embrionario para revertir las anormalidades resolvería esa cuestión y aclararía, por tanto, el papel de ese núcleo en el funcionamiento normal.

¿Con qué nos encontramos? Los injertos de células tomadas de la región precursora del nucleus basalis de embriones de rata e implantados directamente en la corteza denervada de ratas inyectadas con toxina restablecían la memoria espacial a la normalidad, aunque las ratas inyectadas todavía aprendían sus tareas más lentamente que lo hacían las ratas normales. Los injertos también corregían algunas de las asimetrías de movimiento, pero no revertían las deficiencias de la sensibilidad. Los transplantes control de células del hipocampo embrionario, que han perdido la acetilcolina, no servían para nada.

Además de sugerir que los transplantes podían revertir anomalías parecidas a las de las enfermedades de Alzheimer, este resultado confirma también que las vías colinérgicas, desde el nucleus basalis hasta la corteza, intervienen en la memoria espacial, dificultada en las ratas lesionadas. Los transplantes podrían emplearse del mismo modo para el análisis de la neuroanatomía funcional en todo el sistema nervioso central. Cuando resulta difícil eliminar sólo parte de una vía con gran proyección o de una estructura compleja para investigar su función con detalle, es posible conseguir el mismo fin si se destruye entera la estructura o la vía y se reconstruye luego con injertos la parte que interesa.

La hipersensibilidad por denervación no basta, por sí misma, para justificar los importantes efectos de comportamiento de los injertos nerviosos. En el cerebro normal muchas neuronas emiten precisos "mensajes tipo" en respuesta a señales adecuadas de otras neuronas. No se suele transplantar las neuronas injertadas a su sitio habitual, sino a otro distante, y no se sabe si establecen modelos normales de sinapsis: las zonas de comunicación con neuronas blanco a las que otras neuronas liberan el neurotransmisor. Si las neuronas transplantadas no se comunican específicamente con las neuronas hospedadoras, ¿cómo pueden los transplantes restablecer cualquier conducta dañada?

Ante la eficacia que muestran en su acción, cabe suponer que la dopamina, acetilcolina y presumiblemente otros neurotransmisores no operen emitiendo críticamente mensajes modelo, sino modulando el nivel general o la naturaleza de la actividad de las células blanco, o bien su respuesta a otras señales. Dadas esas condiciones, el neurotransmisor podría desarrollar eficazmente su misión aun cuando su liberación no esté estrictamente regulada y alcance su objetivo por progresiva difusión.

Al contrario que los neurotransmisores, las hormonas que son secretadas por determinadas estructuras cerebrales recorren normalmente importantes distancias hasta sus objectivos; su liberación puede estar controlada, no por señales de células adyacentes, sino por factores difusibles transportados en la sangre o liberados por otras estructuras del cerebro. Las enfermedades neuroendocrinas –el resultado de déficits de algunas hormonas cerebrales– son, por consiguiente, candidatas prometedoras para el injerto. La primera de estas enfermedades en la que se ha ensayado esta técnica en el laboratorio es la diabetes insipidus. Se caracteriza porque los enfermos presentan sed y eliminación de orina excesivas. Los síntomas indican una deficiencia de vasopresina, una hormona que controla el balance de fluidos y la presión sanguínea, regulando la concentración de la orina en el riñón y provocando la constricción de los vasos sanguíneos periféricos.

La hormona, que también parece modificar la conducta del cerebro, es sintetizada por las neuronas alojadas enfrente del hipotálamo, estructura cerebral que controla numerosas funciones fisiológicas. Las neuronas envían axones a la parte posterior de la glándula pituitaria, donde se libera la vasopresina. En el género humano, la diabetes insipidus procede casi siempre de tumores o traumas que interesan la pituitaria; hay, sin embargo, un tipo de ratas de laboratorio que presenta una forma congénita de la enfermedad. Han nacido sin las neuronas productoras de vasopresina.

Don M. Gash y John R. Sladek Jr.,

8. OTRA CARACTERISTICA DE LA ENFERMEDAD DE ALZHEIMER, el agotamiento de acetilcolina en la corteza, ha sido simulada por el autor de este artículo y sus colegas. Una inyección de ácido iboténico destruía las grandes células del nucleus basalis, que emiten fibras colinérgicas a la corteza. La pérdida de memoria resultante podía ponerse de manifiesto con un laberinto acuático. Una rata normal, entrenada para encontrar una plataforma sumergida, nadará sobre la zona buscando la plataforma, aunque se la hubiera retirado. Por el contrario, el itinerario recorrido por una rata inyectada sugiere que el animal no recuerda la posición inicial de la plataforma. Después del transplante de células embrionarias del nucleus basalis en la corteza, la rata se somete a un nuevo entrenamiento y es capaz de recordar la situación de la plataforma.

de la Facultad de Medicina y Estomatología de la Universidad de Rochester, transplantaron fragmentos de hipotálamo embrionario en un ventrículo cerebral de ratas afectadas. Observaron una continua mejoría en el balance de fluidos en un 25 por ciento de los casos: la ingestión de agua disminuyó y la orina era más concentrada. Seis meses después del transplante, encontraron en los injertos numerosas neuronas supervivientes que contenían vasopresina.

La enfermedad neuroendocrina conocida como hipogonadismo hipogonadotrófico, o síndrome de Kallmann, admite también su imitación en un modelo de laboratorio. La enfermedad, una condición congénita asociada al cromosoma sexual *X*, impide que los niños alcancen la madurez sexual. La hormona que falta es la llamada liberadora de gonadotropina (GnRH). La GnRH se sintetiza en el hipotálamo; provoca que la pituitaria secrete otras hormonas que, a su vez, influyen en la maduración de los testículos y en la producción de testosterona, la hormona típica del sexo masculino.

La misma condición se da en algunos mutantes de ratón. Dorothy T. Krieger, trabajando con Perlow y Marie J. Gibson en la Facultad de Medicina del Monte Sinaí de Nueva York, Harry M. Charlton, de la Universidad de Oxford, y otros investigadores, trataron ratones hipogonadales transplantándoles neuronas que contenían GnRH de embriones en los ventrículos cerebrales cercanos a la posición normal de las células en el hipotálamo. Al cabo de dos meses, los testículos de los receptores habían madurado parcialmente y producían esperma normal. Un examen posterior de los cerebros de los ratones mostraba abundante crecimiento de fibras, que se extendían desde las neuronas transplantadas hasta sus objetivos normales: los capilares especializados que transportan GnRH a la glándula pituitaria.

Para que un transplante intracerebral tenga valor potencial no es necesario que las raíces del déficit hormonal residan en el cerebro. Los esfuerzos para tratar trastornos endocrinos, como la diabetes mellitus, por transplante de tejidos secretores de hormonas a otros lugares en animales de experimentación o pacientes humanos, fracasan a no ser que los sujetos hayan recibido, para evitar el rechazo del injerto, un fuerte tratamiento con drogas inmunosupresoras. Sin embargo, estos tejidos pueden sobrevivir y desarrollar sus funciones si son implantados en los confines inmunológicamente privilegiados del cerebro. Los estímulos químicos circulantes, que desencadenan la secreción hormonal, están presentes en el fluido cerebro-espinal que llena los ventrículos cerebrales, y las hormonas secretadas pueden regresar al sistema circulatorio gracias a las membranas celulares especiales que transportan hacia la sangre pequeñísimas gotitas de fluido cerebro-espinal.

Esta idea fue sometida a comprobación hace más de 40 años por Charles M. Pomerat y sus colaboradores, de la Universidad de Alabama, quienes transplantaron tejido de la glándula suprarrenal de ratas recién nacidas en cerebros de ratas adultas a las que se había extirpado las suyas. El tejido injertado sobrevivió y maduró, y durante más de ocho meses corrigió las deficiencias hormonales provocadas por la extirpación de las glándulas.

Recientemente, yo, y de forma independiente Wah Jun Tze y Joseph Tai, de la Universidad de British Columbia, revertimos la diabetes mellitus inducida químicamente en ratas al transplantar células secretoras de insulina del páncreas de otras ratas en el cerebro de animales diabéticos. Tze y Tai han demostrado que estos transplantes sirven también en la diabetes que se presenta de forma espontánea, encontrada en un tipo particular de ratas, que se considera el ejemplo animal más parecido al ataque juvenil de la diabetes dependiente de insulina en el género humano.

Con el mejor conocimiento de la biología de los transplantes en el sistema nervioso central de mamíferos se comprobará su potencial para detener el deterioro del mismo o recuperar capacidades perdidas en un número creciente de trastornos. Junto con Francesco Scaravilli, del Hospital Nacional de Londres, estoy explorando el posible valor de estos transplantes en los defectos metabólicos hereditarios; verbigracia, en las anomalías de almacenamiento lisosómico. Estas alteraciones, provocadas por deficiencias en las enzimas necesarias para romper moléculas complejas dentro de la célula, producen a menudo importantes deterioros neurológicos. Los transplantes de células apropiadas en el cerebro pueden sustituir las enzimas ausentes y evitar la degeneración. En otras investigaciones abordadas con Brian Meldrum y Smita Patel, del Instituto de Psiquiatría de Londres, y Harry Robertson y Georgia Cottrell, de la Universidad de Dalhousie, estoy estudiando la capacidad de las neuronas inhibidoras transplantadas para evitar los ataques epilépticos inducidos experimentalmente en ratas.

El trabajo que he descrito representa sólo el primer paso hacia el desarrollo de terapias fidedignas para las enfermedades humanas; los procedimientos que han tenido éxito con ratas se están empezando a ensayar con monos en varios laboratorios, incluido el mío propio. Sin embargo, es un sentir generalizado que es urgente intentar transplantes nerviosos en seres humanos. Muchas de las enfermedades humanas, que han sido simuladas y tratadas en animales de experimentación con transplantes, suelen ser incurables. Los síntomas de la enfermedad de Parkinson pueden aliviarse frecuentemente con la droga L-dopa, pero ello no detiene el progreso fatal de esta enfermedad. Para la de Alzheimer no existen tales paliativos. Olson y Seiger, trabajando con Erik-Olof Backlund, del Hospital Instituto Carolino de Estocolmo, han transplantado ya células de glándulas suprarrenales en el cerebro de cuatro pacientes con la enfermedad de Parkinson avanzada. Ninguno de los enfermos ha experimentado una recuperación significativa y duradera, aunque varios de ellos conocieran mejorías pasajeras.

El transplante en el sistema nervioso central de seres humanos constituye un problema ético. ¿Deben utilizarse, para tratar pacientes con enfermedades progresivas y fatales, procedimientos experimentales que han tenido éxito en imperfectos modelos animales, pero que no se han comprobado en primates y que pueden conllevar riesgos desconocidos y quizá peligrosos? La decisión merece una mayor consideración de la que ha recibido hasta ahora. Si los experimentos de las enfermedades humanas con modelos de primates establecieran de forma clara el valor de estos procedimientos, habría que responder, antes de proseguir, a otras cuestiones éticas: aunque las células nerviosas derivadas de ciertos tumores pueden crecer en cultivos y han sido ya transplantadas con éxito en roedores, el tejido de los fetos humanos abortados parece ser la mejor fuente de neuronas embrionarias para el transplante en seres humanos.

Ciencia y sociedad

Radón y sus hijos

Los peligros que acechan a la salud en los países industrializados parecen derivar, en su inmensa mayoría, de la actividad humana. Son del dominio público los riesgos asociados con el transporte, la asistencia médica, el trabajo y la producción de energía, sobre todo las centrales nucleares. Pero la fuente de la mayor dosis de radiación ionizante que probablemente recibamos la mayoría a lo largo de la vida no la ha creado el hombre. Se trata del radón, un gas radiactivo que emana de las formaciones rocosas a medida que se desintegra el uranio que contienen. Muchos epidemiólogos y ambientalistas consideran que ese gas provoca cáncer de pulmón en personas que no se han expuesto a mayores peligros que el de habitar en casas levantadas sobre sus piedras. Dada la magnitud de los riesgos potenciales, los científicos abogan por una acción inmediata para contrarrestarlos. Otros, sin embargo, consideran prioritario recabar más información antes de tomar cualquier medida de largo alcance.

Del ruido que ha provocado el debate sobresalen unos cuantos datos que gozan de aceptación general. El radón constituye un eslabón de la cadena de desintegración radiactiva que comienza con la transmutación del uranio en torio y culmina con la formación de un isótopo estable del plomo. El gas emana sin cesar del terreno, puesto que hay uranio en casi todos los suelos y rocas. Al aire libre el radón se disipa de inmediato. Pero en los edificios, el gas que se introduce por pequeñas fisuras de los cimientos y asciende por las tuberías de desagüe o se cuela por el zócalo de las paredes llega a acumularse en concentraciones diez, cien o mil veces superiores a las del exterior.

El radón no supone, por sí mismo, un grave peligro de exposición directa a la radiación. Aun cuando el gas la emite (en forma de partículas alfa, esto es, núcleos de helio, que pueden transformar una célula normal en cancerosa), no se mantiene demasiado tiempo a una proximidad peligrosa de los tejidos pulmonares susceptibles. En efecto, químicamente inerte, el radón que se inhala se exhala o pasa de los pulmones a la sangre. Sin embargo, ciertos "hijos", o fruto de su desintegración radiactiva, aportan la dosis principal de radiación del tejido pulmonar. Esos isótopos radiactivos sí presentan reactividad química. Pueden adherirse al revestimiento de las vías bronquiales, bien en forma elemental, bien adsorbidos a diminutas partículas aéreas, e irradian el tejido adyacente.

Los primeros indicios de la percolación de altas concentraciones de radón, potencialmente peligrosas, del suelo a los edificios se obtuvieron a mediados de la década de 1970 en Suecia, en la medición de casas recién construidas y dotadas de buen aislamiento. Instado por esos hallazgos, el Departamento estadounidense de Energía financió la investigación sobre el radón contenido en el interior de las casas, ante la posibilidad de que las medidas tomadas en favor de la conservación de la energía, por ejemplo la instalación de espuma adhesiva para impedir el paso del aire, hubieran llevado a muchos a construirse "trampas de radón". Puesto que las casas con un buen aislamiento energético se diseñan para minimizar la tasa de ventilación (la tasa de intercambio de aire entre el exterior y el interior), era de presumir que en esos edificios fueran superiores los niveles del gas.

En efecto, en algunas de esas edificaciones se observó un elevado nivel del elemento, pero también en casas viejas y mal acondicionadas. La mayoría de los investigadores concede hoy poca importancia a la ventilación. Merril Eisenbud, del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, mantiene que la errónea asociación entre ventilación y nivel de radón probablemente derive de que "los programas de conservación doméstica de la energía coincidieron con el desarrollo de instrumentos de medición local de radón". Anthony V. Nero, del Laboratorio Lawrence Berkeley, indica que la variable que mejor explica la amplia gama de niveles de radón (que difiere a veces de una casa a otra en un factor de 1000) no es la tasa de ventilación, sino la de invasión: la tasa a la que el gas se infiltra en el edificio. En su mayor parte, lo que empuja el gas hacia el interior es la diferencia de presión del aire entre el exterior y el interior; la presión en el suelo rebasa ligeramente la del interior del hogar. Tal gradiente de presiones pueden generarlo las corrientes de aire exteriores, así como una temperatura más alta dentro que fuera de la edificaciones.

Con esos datos, los científicos han ideado diversos modos de reducir la cantidad de radón que invade las casas. Las medidas a tomar van desde el aislamiento de la infraestructura hasta la reducción de la presión del aire en el suelo subyacente por medio de ventiladores de succión. Sin embargo, antes de que los organismos oficiales se planteen siquiera la promoción de contramedidas, deben saber si la gravedad del problema justifica esa acción. Y aquí el asunto se enturbia.

La prueba fundamental que establece la relación entre exposición al radón (incluidos los productos de su desintegración radiactiva) y cáncer de pulmón procede de datos epidemiológicos relativos a mineros que trabajaron en explotaciones de uranio hace entre 20 y 30 años, y cuya exposición al gas, superior a la normal, no puede establecerse con exactitud. El análisis de esos datos exige la identificación y consideración de otros factores que pudieran influir en las tasas de mortandad o morbilidad de la población estudiada. En algunos casos, las compensaciones introducidas para contrarrestar los efectos debidos al tabaquismo y la exposición a otros carcinógenos del entorno de trabajo dejan tan sólo un pequeño porcentaje de cánceres de pulmón atribuibles a la exposición al radón.

Viene a complicar los estudios la comprobación de que el efecto conjunto de fumar e inhalar aire con gran concentración de radón es notablemente peor que el efecto aislado de cualquiera de esos factores. Eisenbud afirma que se ha infravalorado el papel desempeñado por ese sinergismo en la carcinogénesis pulmonar, aunque admite que las pruebas epidemiológicas constituyen, todo lo más, "un buen punto de partida".

Ante las limitaciones de los datos epidemiológicos, los investigadores han acudido a otros estudios. Los resultados obtenidos en experimentos con animales parecen coincidir con las cifras epidemiológicas en que se advierte una relación lineal entre la dosis de radón y la incidencia de cáncer pulmonar. Si partimos de las elevadas tasas de cáncer de pulmón y de los altos índices de exposición al radón de los mineros y extrapolamos linealmente, hacia abajo, hasta los niveles domésticos, se obtiene, para los Estados Unidos, una estimación de unos 10.000 cánceres anuales relacionados con el radón. Lo que equivale a un 10 por ciento de la incidencia total de cáncer de pulmón en Norteamérica.

Sin embargo, algunos investigadores dudan de la validez de esa extrapolación. Por de pronto, Bernard L. Cohen, que dirige un programa de medición de los niveles residenciales de radón desarrollado en la Universidad de Pittsburgh, ha llegado a una conclusión opuesta. Sostiene que, en el rango de niveles de radón correspondiente a la mayoría de las edificaciones, notablemente inferior al habitual en las minas de uranio, no resulta aplicable la respuesta lineal a la dosis. Cohen, igual que la mayoría de los radiobiólogos, defiende que, por debajo de cierto nivel, la incidencia de cáncer de pulmón no depende de la exposición al radón.

Nero duda de que los datos epidemiológicos lleguen nunca a demostrar por sí solos los efectos del radón sobre la salud pública. En su opinión, en las concentraciones de radón comunes en los hogares cualquier incremento del número de cánceres quedaría enmascarado por la enorme cantidad de cánceres "de fondo" provocados por el tabaquismo y la exposición a otros carcinógenos ambientales. Lo que no le impide reconocer que el radón "constituye seguramente el caso mejor determinado de exposición ambiental que probablemente provoca cáncer —incluidos los carcinógenos sometidos a regulación gubernamental".

El otro aspecto obscuro se refiere a la extensión del problema, a saber, el número de habitantes afectados por la concentración de radón que se considere "insegura". Un informe del Instituto Nacional de Estadística señala que en casi todos los estados de la Unión se han detectado niveles altos de radón en las casas. Sin embargo, hasta la fecha los datos sobre esos niveles no se han recolectado de modo sistemático; puede que las casas seleccionadas para la medición no reflejen la distribución real de los niveles de radón en los Estados Unidos. Para poner remedio a la situación, la Oficina de Protección del Ambiente está dispuesta a acometer lo que los funcionarios consideran la inspección más exhaustiva de los niveles domésticos de radón efectuada hasta hoy. Durante un año, y aplicando técnicas instrumentales adecuadas, se medirá la concentración del elemento en una muestra de edificios residenciales que cubre la nación entera.

Otoño nuclear

A quienes abordaron por primera vez los probables efectos climáticos de la guerra nuclear, que definen lo que se ha dado en llamar invierno nu-

clear, se les criticó por abusar tanto de datos inseguros que acabaron por exagerar tales efectos. Sin embargo, incluso la reciente hipótesis sobre un invierno nuclear más suave, actualizada y propuesta por Starley L. Thompson y Stephen H. Schneider, del Centro Nacional estadounidense de Investigación Atmosférica, parece acercarse bastante a la hipótesis que presentaron originalmente Richard P. Turco, Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman, James B. Pollack y Carl Sagan en el informe TTAPS (siglas de las inicales de los autores), publicado en *Science* hace unos tres años.

El informe TTAPS sostenía que el humo y polvo generados por una guerra nuclear generalizada bloquearía la radiación solar que en condiciones normales llega a la superficie de la Tierra y, por tanto, provocaría largos períodos de oscuridad y un descenso térmico anormal en las masas terrestres. Tales perturbaciones ambientales aniquilarían la vida vegetal, que constituye el eslabón fundamental del ciclo alimentario humano, amenazando a la civilización entera y probablemente a la especie humana. El informe señalaba, además, que la transición entre una leve atenuación de la radiación solar y un bloqueo total se produciría en un estrecho margen "umbral" de valores de la cantidad de materia eyectada a la atmósfera; esa cantidad umbral podría generarla la explosión de 100 megatones (potencia equivalente a 100 millones de toneladas de TNT) sobre 100 ciudades.

Thompson y Schneider, en un trabajo que publica *Foreign Affairs*, concluyen que los efectos climáticos de una guerra nuclear (en especial los descensos mundiales de temperatura) serían menos drásticos que los predichos en el informe TTAPS. Admiten la probabilidad de que se registren efectos climáticos suficientemente graves para que se altere el entorno global, pero rechazan la idea de un umbral de invierno nuclear cuantificable y relegan la posibilidad de extinción humana a "un nivel de probabilidad irrelevante".

Los autores del TTAPS señalan que las nuevas temperaturas que se proponen no representan ninguna contradicción de importancia. Si bien su informe citaba la posibilidad de una caída de entre 20 y 40 grados Celsius en el caso considerado de línea base (guerra nuclear de 5000 megatones) en el caso de que el conflicto estallara en verano, tal predicción se apoyaba en un modelo de atmósfera unidimensional (en el cual las condiciones atmosféricas se promedian a lo largo de las latitudes y las longitudes) aplicado a un hipotético planeta recubierto de masas continentales. Dada la gran reserva de calor que constituyen los océanos, su exclusión del modelo se tradujo en una sobreestimación de la caída térmica. El propio informe TTAPS sugería que la inclusión de los océanos en un modelo más complejo reduciría los descensos de temperatura predichos a la mitad.

Thompson y Schneider basan sus hallazgos precisamente en ese tipo de modelo: un modelo tridimensional de la atmósfera que considera los efectos atenuantes de los océanos, la distribución geográfica del humo en la atmósfera y las variaciones climáticas estacionales. Las estimaciones de descensos térmicos apuntados por Thompson y Schneider, que van de los cinco a los 15 grados, parecen ajustarse a lo que se predijo en el informe TTAPS.

Argumenta Sagan que resulta difícil asignar una cantidad dada de humo y polvo atmosférico a la explosión de un determinado número de ingenios nucleares sobre un conjunto específico de objetivos. Mantiene, sin embargo, que resulta plausible expresar, siquiera de una forma burda, el umbral de atenuación de la irradiación solar en términos del número de armas nucleares, en especial a la hora de formular una política nuclear o una relación de objetivos. También sostiene Sagan que, además de los efectos destructores inmediatos de las explosiones nucleares, debidos a la sobrepresión, radiación, incendios y lluvia radiactiva (que, según la Organización Mundial de la Salud, podrían suponer la muerte de hasta mil millones de personas en todo el globo), los efectos climáticos provocarían sin duda otros miles de millones de muertes, lo que acercaría peligrosamente el número total de víctimas al de habitantes de la Tierra.

Los efectos climáticos alcanzan tales dimensiones apocalípticas porque los sistemas agrícolas resultan ser exquisitamente sensibles al descenso de las temperaturas, de los niveles de radiación y del volumen de precipitaciones que cabría esperar incluso de un "otoño" nuclear, en particular durante la estación de crecimiento. Esas perturbaciones podrían rebajar el rendimiento de las cosechas en todo el mundo, y probablemente su pérdida total en el hemisferio Norte, daño que, sumado a la desorganización del comercio, podría desencadenar un hambre de magnitud inconcebible.

En el confín del universo

Un equipo de astrónomos británicos y norteamericanos acaban de descubrir el objeto más lejano de cuantos se han observado hasta la fecha. Se trata de un quasar (una galaxia de núcleo compacto que pudiera ser un agujero negro) situado a 12.400 millones de años-luz. El objeto, cuya lejanía supera en unos 10 millones de años-luz la distancia del quasar más remoto conocido, ocupa una posición situada en el 90 por ciento del borde del universo observable.

Cyril Hazard, de la Universidad de Pittsburgh, R. G. McMahon, de la de Cambridge, y Wallace L. W. Sargent, del Instituto de Tecnología de California, describen en *Nature* cómo midieron la distancia al quasar. Su método se basaba en el modelo de universo que goza hoy de mayor aceptación, a saber, la teoría de la gran explosión, que sostiene que todas las galaxias se alejan uniformemente unas de otras en virtud de la explosión primordial que se registró hace entre 15.000 y 20.000 millones de años. Según esa teoría, cuanto más diste de la Tierra un objeto estelar, mayor será su velocidad. En otros términos, la distancia es proporcional a la velocidad.

Resulta difícil efectuar mediciones directas de la distancia, pero es relativamente sencillo estimar la velocidad. La longitud de onda de la luz emitida por un objeto en recesión aumenta en proporción a su velocidad, igual que parece disminuir el tono de una sirena que se aleja. "En cierto sentido, la luz se expande a medida que lo hace el universo", comenta Sargent. Dado que el aumento de la longitud de onda mueve la luz hacia el extremo rojo del espectro óptico, el fenómeno se denomina desplazamiento hacia el rojo. Midiendo el valor del desplazamiento hacia el rojo de un objeto estelar cabe determinar su velocidad y distancia.

Para medir la distancia del quasar en cuestión, bautizado con el guarismo QSO1208 + 1011, Sargent y sus colegas emplearon una emulsión fotográfica especial y sensible a la luz infrarroja. Con el telescopio Hale de cinco metros de que dispone el Observatorio Palomar determinaron que el quasar presenta un desplazamiento hacia el rojo de 3,8, superior en 0,2 unidades al del quasar inmediatamente más lejano, PKS2000 − 330. Valiéndose del mismo equipo, los astrónomos esperan detectar quásares más alejados, con desplazamientos hacia el rojo de hasta 4,2.

Avances en la fusión por láser

Los haces de láser infrarrojos, convertidos en longitudes de onda más cortas mediante cristales ópticos, podrían calentar hidrógeno pesado a 100 millones de grados. Esta técnica facilitaría el aprovechamiento de la energía de fusión

R. Stephen Craxton, Robert L. McCrory y John M. Soures

El año pasado, cuatro de los mayores sistemas láser del mundo –NOVA, del Laboratorio Lawrence Livermore, de Livermore (California), GEKKO-XII, de la Universidad de Osaka (Japón), PHEBUS, en Lemeil (Francia), y OMEGA, de nuestro laboratorio de la Universidad de Rochester– comenzaron a emitir en longitudes de onda visibles y ultravioletas. En el laboratorio Nacional de Los Alamos se está desarrollando otro láser que emite en longitudes de onda ultravioleta ligeramente más cortas. Muchos de los grandes sistemas desempeñan un papel indiscutible en la investigación y desarrollo de nuevos armamentos. Sin embargo, las líneas de investigación abiertas gracias a estos instrumentos permiten mantener ciertas esperanzas acerca de una destacada aplicación pacífica: en los próximos diez años se comprobará la viabilidad de obtener energía de fusión mediante láser.

Los grandes avances registrados en dos disciplinas avalan ese optimismo. En óptica, el fenómeno conocido como conversión en frecuencias armónicas se ha aprovechado para generar haces láser de gran potencia con longitudes de onda mucho más cortas que las anteriormente alcanzables. Se trata de un salto destacable que posibilita que la energía del láser se transmita a una pastilla de combustible de fusión de una manera más eficaz a longitudes de onda cortas que a longitudes de onda largas.

La simulación por ordenador de modelos de las reacciones de fusión iniciadas por un láser en pastillas (pellets) de combustible han ido ganando en pormenores y acercamiento a las distancias reales. Actualmente, estas simulaciones permiten determinar con bastante precisión las características de las pastillas de combustible y de los haces incidentes necesarios para convertir en económicamente rentable la energía de fusión generada. Además, los instrumentos de extraordinaria precisión permiten seguir la evolución de las reacciones de fusión hasta la centésima de nanosegundo. (El nanosegundo es la milmillonésima de segundo.)

La liberación controlada de la energía que se desprende en la fusión de dos núcleos atómicos ha constituido una de las mayores aspiraciones de la ciencia desde que, hace 40 años, se descubrieran las ventajas potenciales del proceso y se comenzara a trabajar en esa dirección. Es bien sabido que una mezcla de deuterio y tritio, isótopos pesados del hidrógeno, constituye el combustible idóneo para la fusión. Se trata de conseguir, y mantener, el calentamiento de los iones de deuterio y tritio a temperaturas que nos proporcionen una ganancia energética neta a partir de la fusión de los iones. En cada reacción de fusión, un ion de deuterio y otro de tritio rinden una partícula alfa, o núcleo de helio, y un neutrón; la energía cinética total que se libera, y que se reparte entre los dos productos de la reacción, viene a suponer unos 17,6 millones de electronvolt.

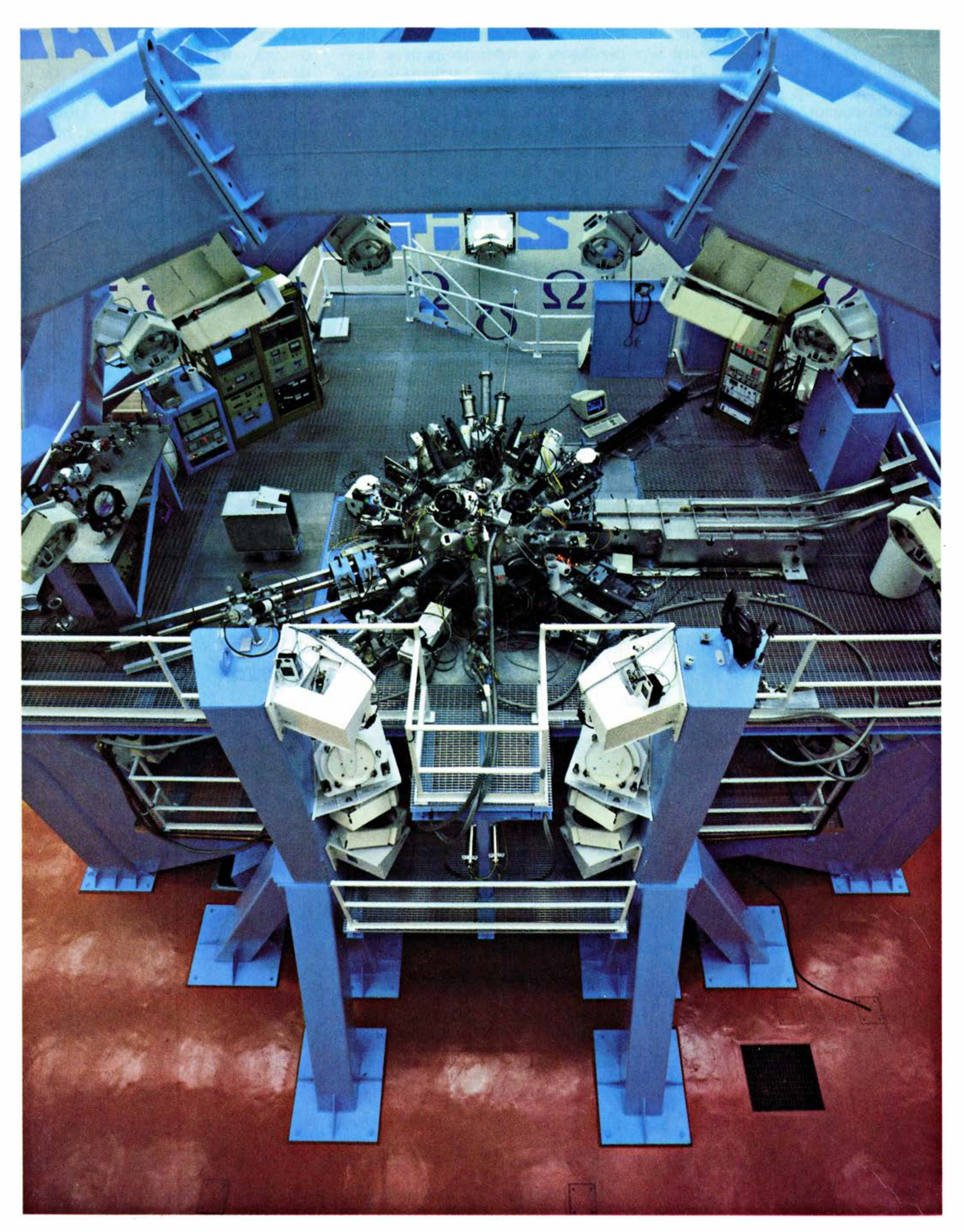
A largo plazo, la fusión exclusiva de átomos de deuterio podría aportar una fuente de energía virtualmente inagotable, si consideramos las inmensas reservas de deuterio del agua de mar. Para hacernos una idea, la energía de fusión del deuterio contenido en el agua de una piscina de 30 metros de lado y 2 metros de profundidad bastaría para abastecer de energía eléctrica una ciudad mediana un año entero.

Fusión por láser

El método más conocido para alcanzar las condiciones de fusión consiste en calentar un plasma, un gas de iones y electrones libres, eléctricamente neutro, confinado mediante un campo magnético intenso. (Véase el artículo "Reactores de fusión por confinamiento magnético", de Robert W. Conn: INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1983.) Sin embargo, a comienzos de los setenta algunos investigadores empezaron a experimentar en los Estados Unidos con un método radicalmente distinto de calentamiento y confinamiento del plasma, aprovechando la enorme capacidad calefactora del láser. Un haz o pulso de luz láser se disgrega en haces menores de igual intensidad. Se incrementa la energía de los haces divididos y se vuelven a unir posteriormente por medio de un sistema de espejos y lentes: así, los haces se enfocan desde diversas direcciones hacia una pequeña región. Se introducen cargas de combustible, deuterio y tritio, en una cápsula esférica de unos pocos milímetros de diámetro, fabricada en plástico, vidrio u otro material; la pastilla de combustible resultante se sitúa en la intersección de los haces, para provocar su iluminación uniforme.

El pulso de láser ioniza, casi instantáneamente, los átomos de la capa exterior de la pastilla; el material del interior, de cierto radio crítico, se mantiene opaco a la energía del láser. La energía incidente es absorbida en la densa capa de plasma que rodea el combustible de deuterio y tritio. La capa calentada de plasma se expande y se separa del resto de la pastilla; la velocidad del plasma de ablación es de unos 1000 kilómetros por segundo. Una fuerza igual y opuesta, tal como establece la tercera ley de Newton, acelera el material encerrado por la capa de ablación hacia adentro, como si fuera un cohete propulsado por un plasma que escapara de él en todas direcciones. La fuerza concéntrica de implosión acelera el resto de la cápsula hasta una velocidad de varios cientos de kilómetros por segundo en una milmillonésima de segundo. El radio del combustible se comprime hasta su quincuagésima parte; la elevada temperatura y la alta densidad del combustible provocan entonces la fusión del mismo.

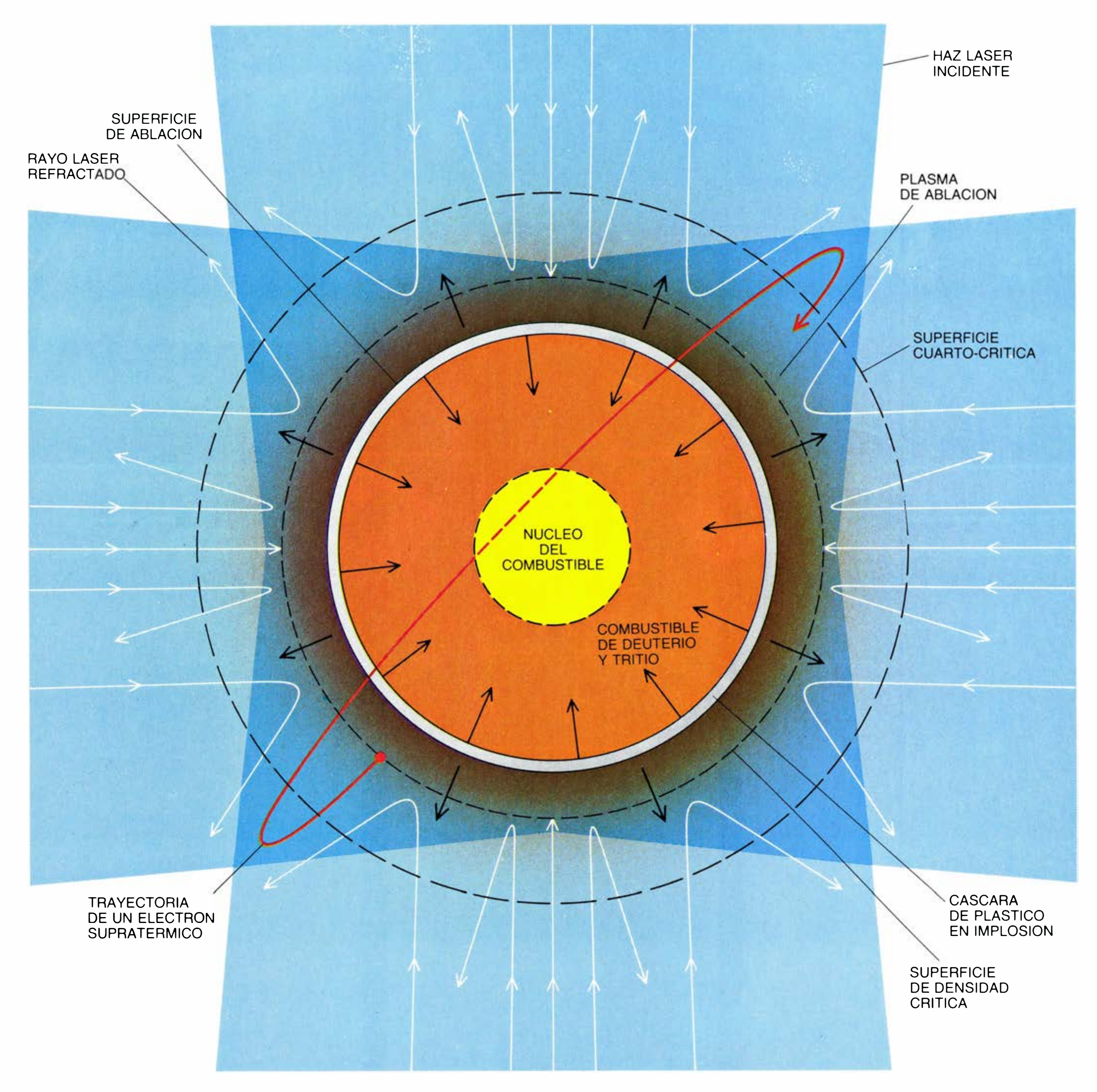
En un reactor de fusión en funcionamiento, los neutrones producidos en



1. AREA DE BLANCO del sistema láser OMEGA, que funciona en la Universidad de Rochester. El sistema consta de un láser de neodimio vítreo convertido a longitudes de onda más cortas que permite estudiar las propiedades de las pastillas de combustible para la fusión por láser. El láser empieza emitiendo un solo haz infrarrojo cuya longitud de onda es de un micrometro. El haz se magnifica (amplifica) y se descompone en 24 haces. Tras una nueva amplificación, se les obliga, a cada uno de los 24, a atravesar una célula que contiene dos cristales de fosfato de dihidrógeno y potasio (KDP), donde se convierten en luz ultravioleta con una frecuencia triple de la incidente. Espejos y lentes guían y enfocan los haces, hacia una cámara que sirve de blanco, el enmarañado aparato esférico del centro de la fotografía. Se produce el vacío en dicha cámara, con la pastilla de combustible suspendida en el centro; los 24 haces enfocados se hacen converger hacia la pastilla, y allí depositan su energía. Los instrumentos para determinar los efectos del láser en la pastilla sobresalen del hemisferio superior.

la reacción escapan del combustible a unas velocidades altísimas y ceden su energía a la cámara que rodea el reactor. En uno de los proyectos, las paredes del reactor se revisten con una capa de litio u otro fluido que haga de tampón. Los neutrones chocan contra el fluido y se amortiguan, cediendo su energía cinética al fluido en forma de calor. El fluido circula hacia un intercambiador de calor que permite transferir la energía a una corriente de vapor presurizado que genere energía eléctrica en una turbina de vapor, según lo acostumbrado. El proceso completo recibe el nombre de fusión por láser.

Aunque vamos a ceñirnos a la fusión por láser, conviene advertir que los aceleradores de haces de partículas pueden también producir la compresión de pastillas de combustible. En el Laboratorio Nacional Sandia, en Albuquerque (Nuevo México), acaba de terminar la construcción del PBFA II ("Particle Beam Fusion Accelerator"; ese acelerador puede inyectar energía a las pastillas de combustible con haces



2. SE PRODUCE LA FUSION POR LASER en una pastilla de combustible constituida por una envoltura o revestimiento de plástico alrededor de un milímetro de diámetro que encierra una mezcla combustible de deuterio y tritio. La envoltura se irradia uniformemente desde diversas direcciones mediante haces láser superpuestos, con lo que su porción más externa se evapora formando un plasma. Los haces láser sólo penetran en el plasma hasta la superficie de densidad crítica, cediendo casi toda su energía en sus cercanías. Existe un mecanismo de absorción energética que goza de extraordinaria eficacia a cortas longitudes de onda del láser: se trata de la llamada absorción por colisión. Los electrones oscilantes en el campo eléctrico del láser calientan el plasma mediante colisiones entre sí y con los iones del plasma. La energía térmica del plasma calentado penetra en la superficie de ablación, frontera entre el plasma caliente y la envoltura densa. El plasma externo a la superficie de ablación estalla, separándose del resto del revestimiento. La reacción provoca que la envoltura penetre en el núcleo de la pastilla de combustible. Esta implosión comprime el combustible hasta formar un núcleo denso, y lo calienta; se produce entonces la reacción termonuclear. En láseres de longitud de onda larga, una fracción importante de la energía se cede a los electrones supratérmicos, muy energéticos. Estos electrones penetran en el núcleo, calentándolo en las etapas iniciales de la implosión e impidiendo la compresión que necesita el encendido de la fusión.

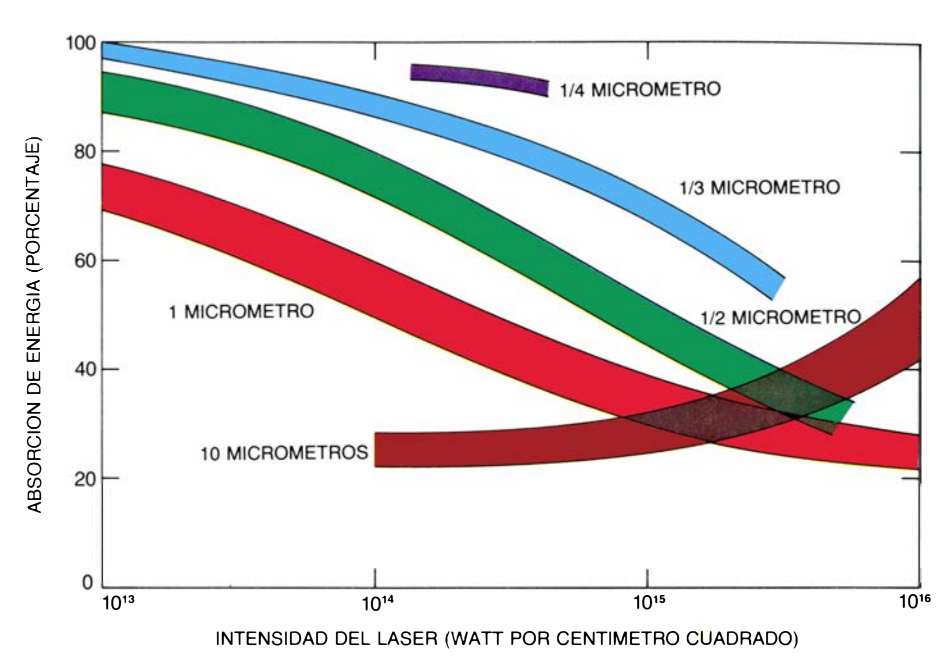
de iones de litio de gran energía. Los métodos que inducen la fusión por compresión de pastillas mediante un láser, un haz de partículas u otra fuente de energía, reciben la denominación colectiva de "fusión por confinamiento inercial".

Láseres de frecuencia convertida

Hasta hace muy poco, los láseres con potencia suficiente para producir reacciones de fusión eran construidos para emitir únicamente a longitudes de onda infrarrojas. La mayor parte del trabajo experimental se llevó a cabo con dos tipos de láser de infrarrojos: el láser, de estado sólido, de vidrio de neodimio dopado, cuya longitud de onda es de un micrometro, y el láser gaseoso de dióxido de carbono, con una longitud de onda de 10 micrometros. A finales de los setenta, sin embargo, cuidadosos experimentos y refinadas simulaciones numéricas propiciaron el acotamiento de una dificultad básica: cuando el láser emite las intensidades necesarias para la fusión, con longitudes de onda de un micrometro o mayores, la pastilla de combustible absorbe menos de la mitad de la energía del láser. Además, los llamados electrones supratérmicos transportan una fracción importante de la energía absorbida. Esos electrones atraviesan libremente la pastilla y calientan el combustible antes de su compresión. Ese calentamiento prematuro impide alcanzar las altas densidades necesarias para la fusión.

Los investigadores se dieron cuenta muy pronto de que el precalentamiento no deseado del combustible podía evitarse si se lograban láseres de alta potencia con longitudes de onda más corta que la infrarroja. El atolladero, no disponiendo de ese tipo de láseres, se superó a través de un interesante truco óptico. Si se provoca el crecimiento de cristales perfectos y se talla después cada uno con un ángulo calculado con precisión respecto a la orientación de la red cristalina, se consiguen piezas que generan los armónicos superiores del haz incidente. La frecuencia de los armónicos es dos, tres o un número entero de veces la de la onda incidente, según la cifra de cristales empleados y la orientación de los mismos en cada pieza; la longitud de onda de los haces correspondientes a cada armónico se acorta en el mismo factor entero.

Pongamos un ejemplo. Hagamos pasar luz láser infrarroja, de longitud de onda larga, a través de un cristal; gran parte de la energía luminosa emergerá en forma de luz verde, con una longitud de onda más corta y con el doble de la frecuencia incidente. Si la luz verde y la luz residual infrarroja atraviesan un segundo cristal, podrán combinarse y formar un haz de luz ultravioleta, de longitud de onda más corta todavía, y con una frecuencia tres veces mayor (una longitud de onda tres veces menor) que la del haz infrarrojo original.



3. EXPERIMENTOS DE ABSORCION con láseres de distinta longitud de onda. Nos demuestran que la energía absorbida por una pastilla de combustible aumenta de manera significativa cuando la longitud de onda del láser se sitúa por debajo de la micra. El efecto adquiere especial magnitud en el intervalo de intensidades entre 10^{14} y 10^{15} watt por centímetro cuadrado, para el que es posible generar la fusión en un reactor irradiado con láser. A tales longitudes de onda, la gran absorción a baja intensidad y la menor absorción a intensidades mayores son las propias de una absorción por colisión, la cual produce el calentamiento deseado del plasma que rodea el combustible. La energía incidente absorbida por los electrones supratérmicos aumenta con la longitud de onda del láser; la energía del electrón supratérmino es muy superior a la del normal.

En un experimento llevado a cabo en la Ecole Polytechnique de Francia, un haz de un micrometro procedente de un láser de neodimio vítreo se hizo pasar por dos cristales en serie de fosfato de dihidrógeno y potasio (KDP); la longitud de onda del haz se redujo en un factor dos en cada cristal, con lo que la reducción total fue, por tanto, de un factor cuatro. La pastilla que actuaba de blanco absorbió casi toda la energía del haz de frecuencia convertida, sin que se detectaran electrones supratérmicos. En estos primeros experimentos, sólo una pequeña parte de la luz incidente se convirtió en luz de frecuencia mayor. Los resultados fueron, no obstante, muy alentadores. Se comenzó a prestar mayor atención a la física de la conversión a frecuencias armónicas, así como a los métodos para mejorar el rendimiento de esa conversión en los láseres de neodimio vítreo ya existentes.

Para apreciar los enormes esfuerzos científicos que tuvieron que dedicarse a la conversión a frecuencias y otros aspectos de la tecnología de fusión por láser, es preciso conocer las condiciones extremas del entorno físico necesarias para que la fusión por láser genere energía rentable. En cada pastilla, la temperatura de combustión ha de alcanzar los 100 millones de grados Celsius, varias veces superior a la que reina en el centro del Sol.

Temperatura

Simultáneamente, se ha de comprimir el combustible hasta lograr una densidad semejante a la que se encuentra en el centro solar: más de mil veces la densidad que tiene, en condiciones ordinarias, en sus fases sólida o líquida, que es de unos 0,2 gramos por centímetro cúbico. Las presiones correspondientes a tales temperaturas y densidades son ingentes: en las implosiones generadas por láser se han alcanzado ya presiones del orden de varios miles de millones de atmósferas. Por otro lado, son cantidades macroscópicas de combustible las que se deben someter a esas condiciones. La creación de un medio con esas condiciones, además de hallar aplicación inmediata a la energía de fusión, abrirá el camino para la experimentación, en laboratorios terrestres, de asuntos de interés directo en astrofísica.

La necesidad de calentar el combustible de fusión síguese de la energética básica de las interacciones nucleares. A muy corto alcance, los protones y neutrones que constituyen el núcleo

atómico se atraen mutuamente con la fuerza fuerte nuclear. Muchos sistemas de núcleos pueden entonces aumentar su energía de enlace si se funden los núcleos. La masa total de los productos de la reacción es, entonces, ligeramente inferior a la suma de las masas de los núcleos que fusionan. De este modo, y según la fórmula de Einstein de la equivalencia entre la energía y la masa, la masa perdida en la reacción se convierte en energía, que se manifiesta en forma de energía cinética de los productos de la reacción.

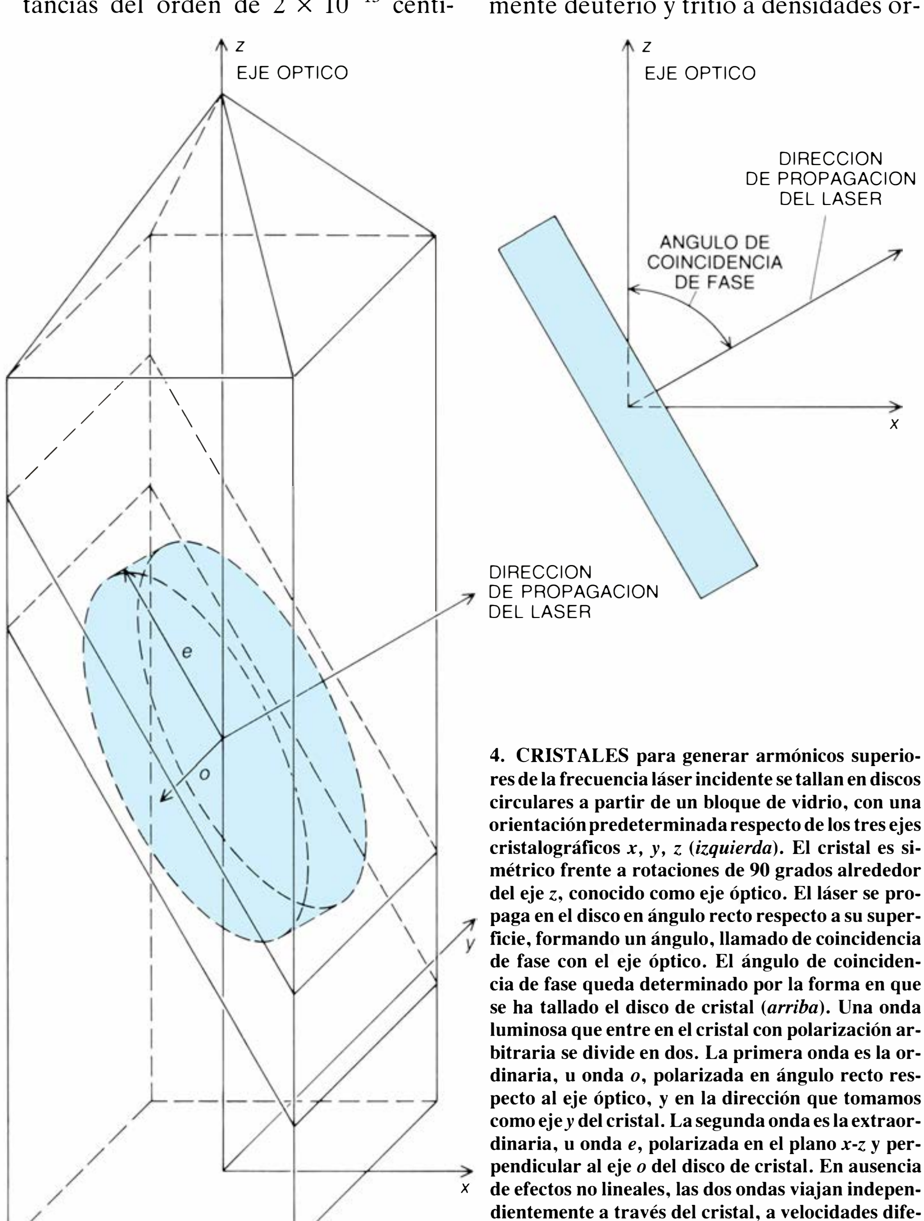
Existe una importante barrera energética para reducir la energía potencial en ese proceso. A temperaturas por debajo de los 10 millones de grados, la repulsión electrostática mutua de los protones, cargados positivamente, de los núcleos, impide a éstos acercarse lo suficiente como para sentir la atracción de la fuerza fuerte. Unicamente a distancias del orden de 2×10^{-13} centímetros –comparables al radio del mismo núcleo– la fuerza fuerte comienza a dominar. Para aproximar dos núcleos hasta distancias de ese orden, es necesario que posean una energía cinética considerable; en otras palabras, debe aumentarse notablemente su temperatura. Una razón que indujo a seleccionar el deuterio y el tritio como combustibles de fusión reside en sus cargas; cada ion porta una sola carga positiva, y carga tan pequeña minimiza la repulsión mutua del combustible.

Compresión

Aunque una gran compresión no constituya un requisito teórico previo para lograr la fusión, aumenta el rendimiento de las reacciones de fusión y es esencial en el diseño práctico de los reactores. La energía de alimentación del láser necesaria para fusionar eficazmente deuterio y tritio a densidades ordinarias está muy por encima de la tecnología actual de los láseres. Cuando el combustible de la pastilla alcanza el pico de compresión, la energía cinética del material que implosiona se convierte en calor, cuyo confinamiento en la pequeña región comprimida aumenta la temperatura del combustible. La ignición termonuclear comienza en una pequeña región de chispa en el centro del combustible. Cuatro quintas partes de la energía liberada en este encendido se convierten en energía cinética de los neutrones, que atraviesan el plasma circundante y depositan su energía en el fluido circulante por la cámara de reacción o bien la ceden en el amortiguador de las paredes.

Las partículas alfa transportan el 20 por ciento restante de la energía liberada en las reacciones de fusión. Por tratarse de partículas cargadas, el combustible las amortigua mucho mejor que en el caso de los neutrones. Colisionan con el combustible circundante y ceden su energía cinética a lo largo de una distancia que es inversamente proporcional a la densidad del combustible. Una fracción considerable de la energía de fusión puede, por tanto, quedarse en las capas más frías del combustible comprimido, si éste adquiere la densidad necesaria y tiene un radio suficiente como para detener las partículas alfa. Esta absorción parcial de la energía de fusión en el combustible resulta crucial para la propagación eficaz de la ignición termonuclear; es el llamado calentamiento autoinducido. Cuando la energía cedida al combustible por las partículas alfa supera la necesaria para comprimir el combustible, se dice que la pastilla ha entrado en ignición. Conocido el valor que puede alcanzar la densidad del combustible comprimido, se determinará el radio del núcleo, la masa de combustible y la energía del láser necesarios para la ignición. Conseguir la ignición supondría remontar uno de los hitos decisivos para demostrar la posibilidad de la fusión por láser.

La elevada compresión requerida tiene su precio: poco después de iniciada, la ignición cesa debido a que la gran presión interna del combustible puede dispersarlo. A mayor compresión, antes se separa el combustible. Ello no obstante, la gran velocidad de reacción a compresión alta compensa con creces el tiempo limitado de ignición. Por ejemplo, manteniendo los restantes factores constantes, comprimir diez veces el radio del combustible implica multiplicar por mil la velocidad de reacción, en tanto que la duración



4. CRISTALES para generar armónicos superiores de la frecuencia láser incidente se tallan en discos circulares a partir de un bloque de vidrio, con una orientación predeterminada respecto de los tres ejes cristalográficos *x*, *y*, *z* (*izquierda*). El cristal es simétrico frente a rotaciones de 90 grados alrededor del eje *z*, conocido como eje óptico. El láser se propaga en el disco en ángulo recto respecto a su superficie, formando un ángulo, llamado de coincidencia de fase con el eje óptico. El ángulo de coincidencia de fase queda determinado por la forma en que se ha tallado el disco de cristal (*arriba*). Una onda luminosa que entre en el cristal con polarización arbitraria se divide en dos. La primera onda es la ordinaria, u onda *o*, polarizada en ángulo recto respecto al eje óptico, y en la dirección que tomamos como eje *y* del cristal. La segunda onda es la extraordinaria, u onda *e*, polarizada en el plano *x*-*z* y perpendicular al eje *o* del disco de cristal. En ausencia de efectos no lineales, las dos ondas viajan independientemente a través del cristal, a velocidades diferentes, determinadas por sus índices de refracción.

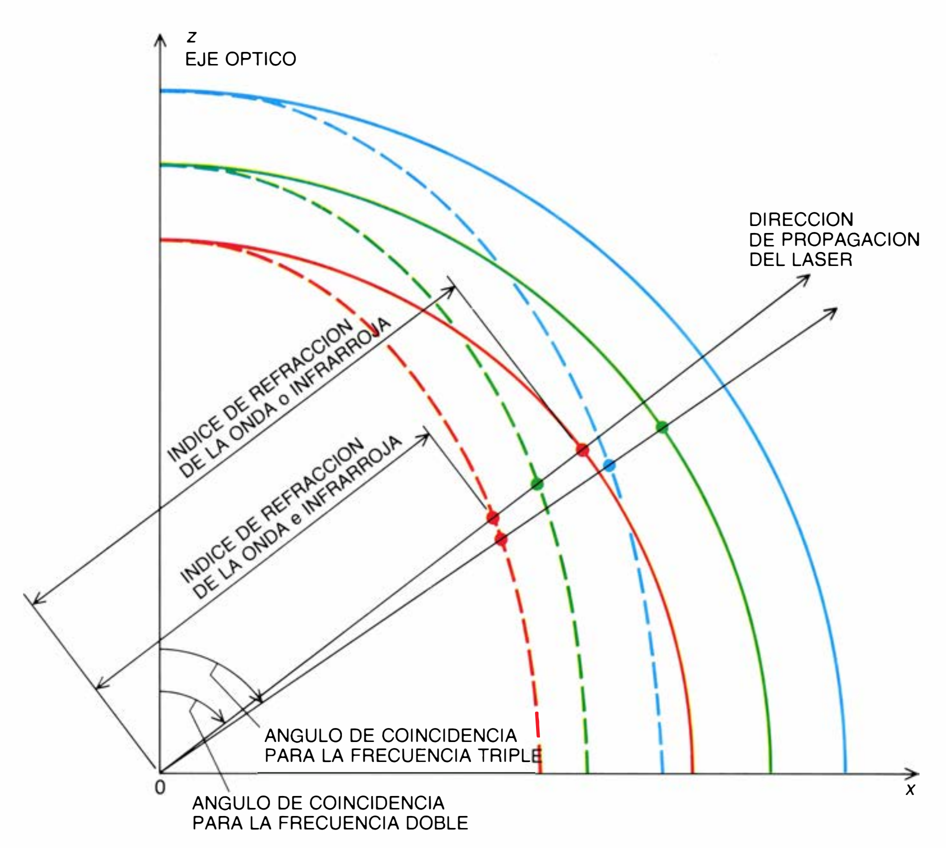
de la combustión se reduce sólo en una décima parte. Hemos de señalar que en los aparatos de fusión magnética, la densidad del combustible es 10.000 millones de veces menor que en el núcleo ardiente de la pastilla. El diseño debe compensar la baja densidad confinando el combustible un tiempo 10.000 millones de veces mayor.

Absorción de la energía de colisión

Aceptada la necesidad de altas temperaturas y densidades, asimismo elevadas, para el combustible, cabe preguntarse cuáles de entre los múltiples aspectos físicos relevantes en la fusión nuclear es imprescindible conocer y controlar. Los procesos cruciales dependen, según parece, de la interacción de la corona o atmósfera de plasma que rodea la pastilla de combustible y de los pormenores de dicha relación. Así, el intercambio de energía entre el láser y la capa de ablación comienza en la corona. Además, el nivel de precalentamiento del combustible que producen los electrones supratérmicos, anterior a la implosión, guarda relación con la física del plasma de la corona.

Después de que la primera irradiación incidente del láser ionice la superficie externa de la cápsula, la corona de plasma resultante comenzará su expansión hacia afuera. La corona es más densa cerca de la superficie de la pastilla y, menos, a medida que aumenta el radio. El láser incidente lleva asociado un campo magnético en rápida oscilación, que causa, a su vez, oscilaciones rápidas en las partículas cargadas más ligeras del plasma, es decir, en los electrones. Aparece, entonces, en el plasma una corriente que oscila con la frecuencia del campo eléctrico inductor y es proporcional a la densidad de electrones del plasma.

En las regiones de la corona externas y, por tanto, menos densas, la corriente es débil; ahora bien, más hacia el interior, donde la densidad electrónica crece, la corriente se hace mayor. Para cierto radio, denominado crítico, la corriente adquiere tal magnitud que protege el plasma interior de la penetración del campo eléctrico incidente. La corriente eléctrica oscilante actúa de antena que emite una onda electromagnética, con una frecuencia igual a la de la onda incidente, aunque transporta energía hacia el exterior del blanco. La densidad electrónica a la profundidad de máxima penetración de la onda incidente se denomina densidad crítica; es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda del láser. Una reducción a un tercio de la longitud de onda del láser aumenta la densidad crítica en nueve veces.



5. ORIENTACION DEL DISCO respecto de los ejes cristalográficos: viene determinada por una construcción geométrica simple. Los arcos en rojo representan la frecuencia incidente del láser infrarrojo; los verdes y azules, su segundo y tercer armónicos respectivamente. Los índices de refracción de las ondas *o* varían con la longitud de onda, pero no con la orientación del disco respecto al eje *z*. El índice de refracción de la onda *o* infrarroja se simboliza con un arco circular rojo, y los índices de refracción de las ondas verde y ultravioleta se ilustran con arcos circulares verdes y azules. Los índices de refracción de las ondas *e* infrarrojas, verdes y ultravioletas varían con el ángulo que forma el disco con el eje *z*; las variaciones están representadas mediante los arcos elípticos discontinuos rojo, verde y azul. La dirección de propagación de la frecuencia doble debe elegirse de suerte tal que el índice de refracción de la onda *e* verde sea igual al promedio de los índices de refracción de las ondas *o* y *e* infrarrojas. Para la frecuencia triple, el índice de refracción de *e* ultravioleta será igual a un tercio del índice de la onda *e* infrarroja, más dos tercios del índice de *o* verde.

Gran parte de la absorción de la energía del láser se produce cerca de la superficie de densidad crítica. Los electrones oscilantes colisionan entre sí y con los iones del plasma, intercambiando parte de su energía al plasma en forma de energía desordenada o calor. Este mecanismo de intercambio de energía es más eficaz en láseres de longitud de onda corta que en los de onda larga, ya que los haces de longitud de onda corta pueden penetrar hasta densidades electrónicas mayores, donde las colisiones son más frecuentes. La energía calorífica se conduce hacia el interior a través de la superficie de ablación, zona limítrofe entre las regiones de explosión e implosión en la pastilla. La absorción por colisión viene a ser la responsable de casi toda la energía absorbida que contribuye a la compresión implosiva de la pastilla.

Existen otros mecanismos de absorción de la energía del láser que no contribuyen al calentamiento o compresión del combustible, pero que deben conocerse, pues generan los molestos electrones supratérmicos. Como su nombre indica, la energía de un electrón supratérmico es sensiblemente superior a la energía media de los electrones térmicos en el plasma. Este exceso de energía sólo se alcanza al acelerar los electrones en un campo eléctrico intenso durante un tiempo suficiente. El campo eléctrico del láser, aunque intenso, cambia de dirección con tal frecuencia que la velocidad de los electrones oscilando en él es bastante pequeña. Así pues, en la mayoría de situaciones experimentales el campo eléctrico del láser no genera directamente electrones supratérmicos.

Pueden, sin embargo, aparecer campos eléctricos intensos en presencia de plasmones, ondas que viajan a través del plasma. Semejantes a ondas sonoras, los plasmones se propagan como compresiones y enrarecimientos de las partículas en la dirección del movimiento de la onda. A diferencia del sonido, sin embargo, los plasmones no

afectan a todas las partículas del medio: los iones del plasma permanecen estacionarios y sólo los electrones se mueven. Se forman zonas de carga neta positiva en regiones de enrarecimiento y zonas negativas en las de compresión. Aparece un gran campo eléctrico entre regiones enrarecidas y comprimidas, dando lugar a una potente fuerza atractiva entre ambas.

Electrones supratérmicos

Cuando un electrón se mueve en la misma dirección que el plasmón y, más o menos, a la misma velocidad, queda atrapado en éste, como si se tratara de una tabla de *surf* arrastrada por la cresta de la ola. Al moverse a la misma velocidad que la onda, sufre el campo eléctrico como si éste no oscilara. El campo lo acelera hasta velocidades supratérmicas, permitiéndole escapar de la capa de plasma antes de que las colisiones puedan amortiguarlo.

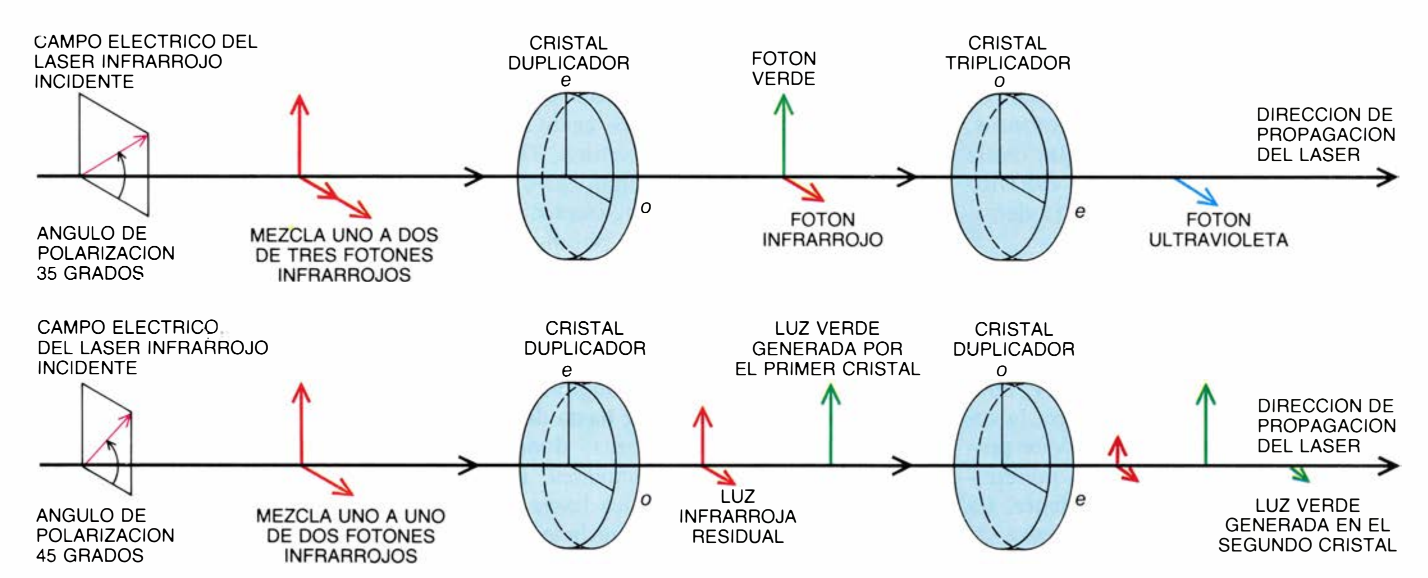
Los plasmones se generan a través de varios mecanismos. Destaca el de absorción resonante. Cuando un rayo láser penetra en el plasma, gran parte de la energía de su campo eléctrico oscilante pasa a los electrones circundantes. Cerca de la superficie de densidad crítica, sin embargo, la frecuencia natural de oscilación de los plasmones se hace igual a la frecuencia del láser. La energía que alcanza esa profundidad en el plasma puede impulsar a los plasmones, por resonancia, hasta grandes amplitudes, a imagen del niño balanceándose en un columpio que llegará cada vez más arriba si empuja en sincronía con la frecuencia natural del columpio. La energía bombeada a los plasmones por resonancia se cede finalmente en forma de energía cinética a los electrones supratérmicos.

Existen otros dos mecanismos importantes mediante los cuales los plasmones generan electrones supratérmicos. A pesar de su relevancia menor en el precalentamiento que la absorción resonante, vale la pena describirlos. Los dos son consecuencia de un fenómeno, conocido como mezcla de tres ondas, que interviene de una manera decisiva en la conversión armónica de frecuencias. En la mezcla de tres ondas, dos de ellas pueden interaccionar con la materia de un plasma o de un sólido cristalino para producir una tercera onda. En general, la mezcla es más intensa cuanto mayores son las amplitudes de las ondas que interactúan. La frecuencia de la tercera onda es la suma de las frecuencias de las dos ondas originales. La dirección del proceso es también reversible: a partir de una onda "producto", se obtienen dos ondas "factores".

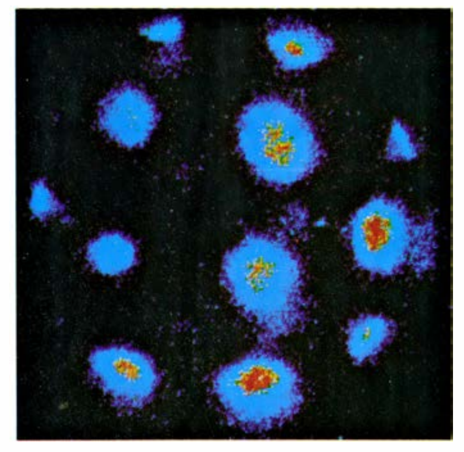
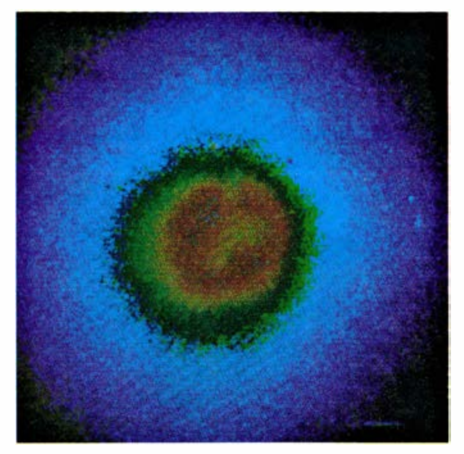
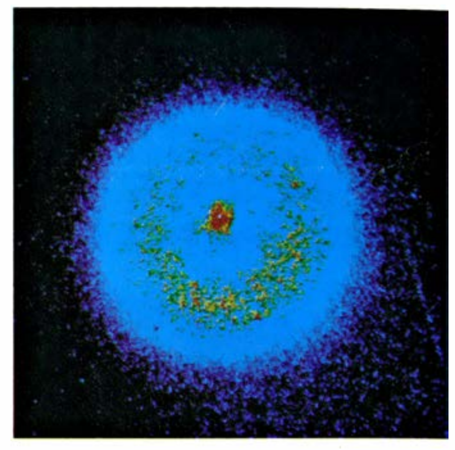
El primer mecanismo de formación de plasmones se denomina inestabilidad biplasmónica. El haz láser actúa, en este caso, como onda producto y se desdobla en dos plasmones, que constituyen las dos ondas "factores". La frecuencia de cada plasmón es la mitad de la del haz incidente. Puesto que la densidad crítica del plasma varía como el inverso de cuadrado de la longitud de onda incidente, los dos plasmones entran en resonancia cuando la densidad electrónica del plasma es la cuarta parte de la densidad crítica del láser incidente. De este modo, la inestabilidad biplasmónica se inicia cerca de la superficie cuarto-crítica.

El segundo mecanismo de generación de plasmones es la dispersión Raman. De nuevo, el haz láser puede considerarse como onda "producto", y sus ondas "factores" son un plasmón y una onda luminosa reflejada. La dispersión Raman se produce en la superficie cuarto-crítica y en regiones menos densas del plasma. Los plasmones generados por la inestabilidad biplasmónica y por la dispersión Raman generan electrones supratérmicos, de manera muy parecida a como los forman en la absorción resonante.

Cuando los primeros electrones supratérmicos escapan de la corona, se induce una carga neta positiva en la pastilla. Los electrones salientes, de nuevo atraídos hacia la pastilla por esa carga, superan su posición inicial y entran en el núcleo de la pastilla. Algunos de entre los más energéticos son capaces de oscilar varias veces a través de la pastilla, antes de que las colisiones con el combustible los amortigüen; la transferencia de energía de colisión al combustible produce el precalentamiento. La fuerza electrostática de atracción entre los electrones supratérmicos y los iones de la corona puede provocar también una aceleración de



6. ESQUEMA DE ROCHESTER DE TRIPLICACION DE FRECUENCIA (*arriba*); utiliza dos cristales cuyos ejes *o* y *e* son perpendiculares entre sí. El haz láser infrarrojo incidente está polarizado a un ángulo de 35 grados respecto al eje *o* del primer cristal. Esto permite asegurar que dos tercios de los fotones que inciden sobre el primer cristal estén alineados con el eje *o* y un tercio con su eje *e*. Un fotón *o* se combina con un fotón *e* para dar un fotón *e* en el segundo armónico (*verde*), al doble de la frecuencia de la luz incidente. El fotón *e* verde se combina, a su vez, en el cristal triplicador con el restante fotón infrarrojo para producir un fotón ultravioleta en el tercer armónico (*azul*). En el laboratorio de los autores, se ha demostrado que esta técnica tiene un rendimiento del 80 por ciento; se está empleando también en el láser NOVA del Laboratorio Nacional estadounidense Lawrence Livermore. Una simple reorientación de los dos cristales (*fila inferior*) permite generar el segundo armónico en el láser NOVA con un mayor rendimiento. El haz incidente está polarizado de suerte tal que el número de fotones *o* y *e* sean iguales. El proceso de duplicación tiene un rendimiento algo inferior al 100 por ciento, y algunos fotones residuales quedan sin convertir después de atravesar el primer cristal. Inclinando el segundo cristal un pequeño ángulo respecto de su posición de triplicador de frecuencia, se convierte en cristal doblador, y los fotones infrarrojos residuales disponen de una segunda oportunidad para convertirse en verdes. (Los esquemas son de Gabor Kiss.)

7. IMAGENES DE RAYOS X para determinar la uniformidad en la irradiación láser de la pastilla de combustible. La imagen de colores resaltados, a la izquierda, muestra la emisión de rayos X cuando los 24 haces del láser ultravioleta OMEGA se enfocan sobre pequeñas áreas de la pastilla. Aunque esta iluminación no conduce a una compresión simétrica, sirve para comprobar la puntería y el enfoque de los haces láser. Las otras dos imágenes son de pastillas que implosionan tras su irradiación con láseres superpuestos. La del centro corresponde a una pastilla grande con una envoltura fina de vidrio; la de la derecha, a una pastilla menor con un revestimiento de vidrio más grueso; ambas pastillas encierran un gas de deuterio y tritio. Las partes rojas de cada imagen representan las regiones de emisión más intensa de rayos X, desde la parte comprimida de la envoltura. La envoltura gruesa mantiene el combustible a menor temperatura en el revestimiento fino, pero también genera una mayor compresión del combustible. La emisión de rayos X se extiende desde la superficie de la pastilla.

los iones más energéticos hacia el exterior. La pérdida de iones energéticos de la capa de ablación sustrae una parte de la energía del láser que podría, en otro caso, contribuir a la implosión.

Los experimentos muestran que, para el intervalo de intensidades del haz involucradas en la fusión por láser –generalmente entre 10^{14} y 10^{15} watt por centímetro cuadrado– las colisiones a longitudes de onda infrarrojas son débiles y la absorción por resonancia es la dominante. Sin embargo, diversos resultados experimentales sugieren que para longitudes de onda inferiores a 0,5 micras el principal mecanismo de absorción es por colisión. Además, para esas longitudes de onda se observa que ni la inestabilidad biplasmónica ni la dispersión Raman precalientan sensiblemente el combustible, a pesar de que sería necesario verificar estos hechos en pastillas mayores, semejantes a las que se utilizarían en reactores comerciales de fusión por láser. Los estudios experimentales han confirmado, pues, las notables ventajas de la fusión por láser de onda corta.

Cristales para conversión de frecuencias

El afán por investigar cómo se puede utilizar la energía del láser en la banda inferior a la micra para comprimir pastillas de combustible ha suscitado el interés reciente por los láseres de frecuencia convertida. Puesto que con la conversión de frecuencia se acorta la longitud de onda del láser a la mitad o a la tercera parte de su valor ordinario de emisión, el intervalo de longitudes de onda deseado resulta accesible con láseres de neodimio vítreo.

Con la obtención de nuevos tipos de láser menguará el valor decisivo de la conversión óptica de frecuencias. En este orden, el láser de fluoruro de kriptón, un láser gaseoso que se está desarrollando en el Laboratorio Nacional de Los Alamos y en otros centros, es capaz de proporcionar la energía suficiente para la implosión fusionante; su longitud de onda de emisión es de sólo 0,25 micrometros. A pesar de que el láser de fluoruro de kriptón se sigue considerando un candidato prometedor para el reactor láser, quedan todavía por resolver algunas cuestiones relativas a su eficacia a la hora de liberar los cortos pulsos de energía necesarios en el reactor. Por el momento, el láser de neodimio vítreo constituye el mejor instrumento en la investigación de las implosiones fusionantes por láser de onda corta.

Se han incorporado muchos tipos de cristal en pequeños sistemas láser, con el fin de convertir la luz láser a frecuencias armónicas más elevadas. Los cristales de KDP, sin embargo, son los únicos que se han podido hacer crecer hasta un tamaño suficiente que les confiera operatividad. Esos cristales crecen en disolución a un ritmo de tan sólo unos centímetros al mes. El mayor cristal disponible de una calidad aceptable mide algo más de 30 centímetros de diámetro y costó cerca de un año desarrollarlo. Se corta el cristal en piezas circulares de alrededor de un centímetro de espesor, que se pulen y se colocan en la trayectoria de la luz láser.

Un cristal puede generar el segundo armónico, una onda cuya frecuencia dobla la del haz fundamental. Un segundo cristal, colocado en el recorrido de la onda que sale del primero, puede mezclar el segundo armónico generado con el fundamental residual, para producir el tercer armónico [*véase la figura 6*], o puede el mismo cristal generar el cuarto armónico en un segundo proceso de desdoblamiento. En principio, no existe límite superior para la frecuencia a generar en etapas sucesivas del desdoblamiento; por desgracia, no se dispone de cristales adecuados que sean transparentes a longitudes de onda por debajo de las 0,2 micras.

Generación de armónicos

La capacidad de generar armónicos, de frecuencia más alta, de un haz láser mediante cierto tipo de cristales se descubrió poco después de la invención del láser. Investigadores de la Universidad de Michigan hallaron que una parte del haz láser que atravesaba un cristal de cuarzo salta con la frecuencia del segundo armónico. Lo dijimos antes: este fenómeno constituye un ejemplo de la mezcla de tres ondas; en este caso, dos componentes del haz láser incidente representan el papel de dos ondas "factores" y el armónico de orden superior saliente es la onda "producto". Las dos componentes del haz incidente surgen cuando el haz atraviesa el cristal, como consecuencia de las asimetrías en la alineación de los átomos que forman la red cristalina.

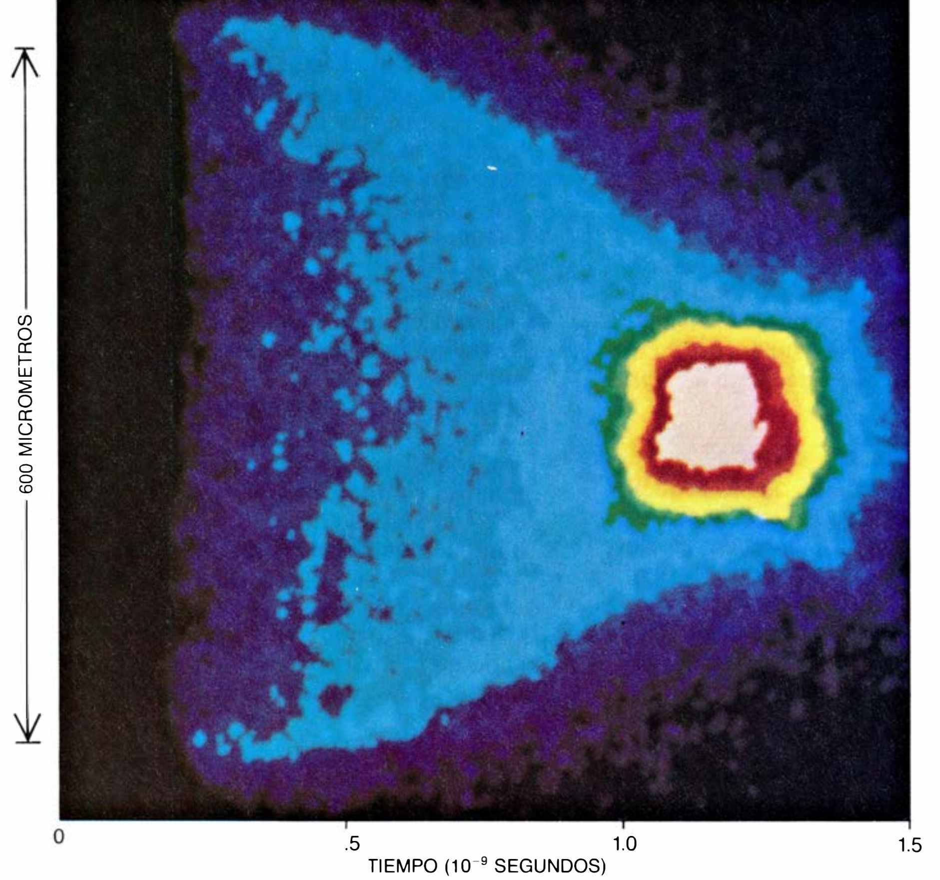
Cuando el campo eléctrico oscilante del láser penetra en el cristal, desplaza a los electrones de sus posiciones de equilibrio, como sucedía en la corona de la pastilla de combustible. En el cristal de KDP es más difícil desplazar a los electrones sobre un eje preferencial conocido como eje óptico o eje z, que en cualquier dirección en el plano x-y,

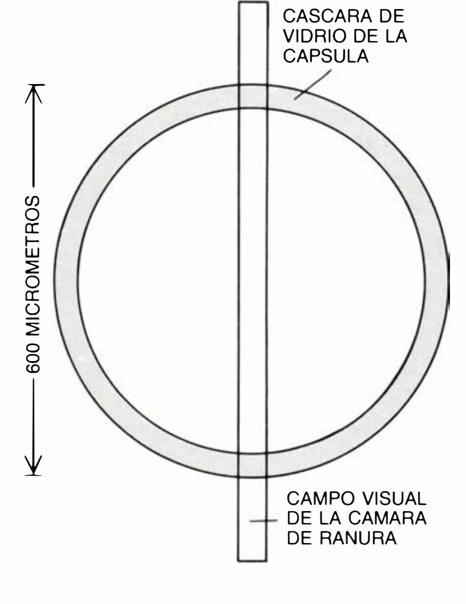
perpendicular al eje z. El cristal es más "rígido" frente a la fuerza del campo eléctrico en la dirección del eje óptico y, por tanto, la onda electromagnética que tiene su campo eléctrico alineado con el eje óptico es la que se propaga con mayor velocidad a través del cristal.

Podemos imaginar el cristal tallado de manera que sus caras formen un ángulo oblicuo con el eje z, y suponer que el rayo de luz incide contra una cara del cristal en ángulo recto [*véase la figura 4*]. El campo eléctrico del rayo, que oscila entonces paralelo a la cara del cristal, tiene dos componentes perpendiculares entre sí. La primera componente, que permanece en el plano x-y, y es paralela a uno de los ejes del cristal (que tomaremos como eje y por convención), se llama rayo ordinario, o rayo o. Al no tener componente en la dirección z, se propaga con cierta lentitud por el cristal. La segunda componente del rayo incidente es perpendicular a la primera en el plano de la cara del cristal. Esta componente se llama extraordinaria, o rayo e, y tiene una componente en la dirección z. Debido a su componente z, que depende de la orientación entre la cara del cristal y el eje z, la componente e del rayo incidente se mueve a través del cristal con mayor rapidez que la componente o.

Cuando la luz láser de gran intensidad viaja por el cristal, los electrones desplazados por la onda eléctrica tienden a percibir una fuerza restauradora que ni se desarrolla en la misma dirección del desplazamiento ni es proporcional a él. Se trata de la respuesta no lineal, o no proporcional, de los electrones a las componentes e y o del campo eléctrico, las que dan lugar a la llamada onda no lineal de corriente. La onda de corriente está constituida por electrones que oscilan en el plano x-y a frecuencia doble de la del haz láser incidente y se mueve a través del cristal a una velocidad igual a la velocidad promedio de los componentes e y o del láser incidente. Precisando más, el índice de refracción de la onda de corriente es el promedio de los índices de refracción de las componentes e y o.

La onda de corriente de los electrones oscilantes genera una onda de luz láser en el segundo armónico del haz láser, de igual modo que los electrones oscilando en una antena generan ondas de radio. Sin embargo, la onda de luz del segundo armónico sólo se puede generar eficazmente si se propaga a la misma velocidad que la onda de corriente; debe estar en fase con la onda de corriente. Por ser una onda e la del segundo armónico del haz láser, su velocidad y, por tanto, su índice de refracción, varían con el ángulo entre la dirección de propagación y el eje óptico. De aquí se sigue que podremos hacer coincidir la velocidad del segundo armónico con la velocidad de la onda de corriente, si se talla el cristal de suerte que la dirección de propagación del láser en el cristal forme con el eje óptico un ángulo predeterminado [*véase la figura 5*].



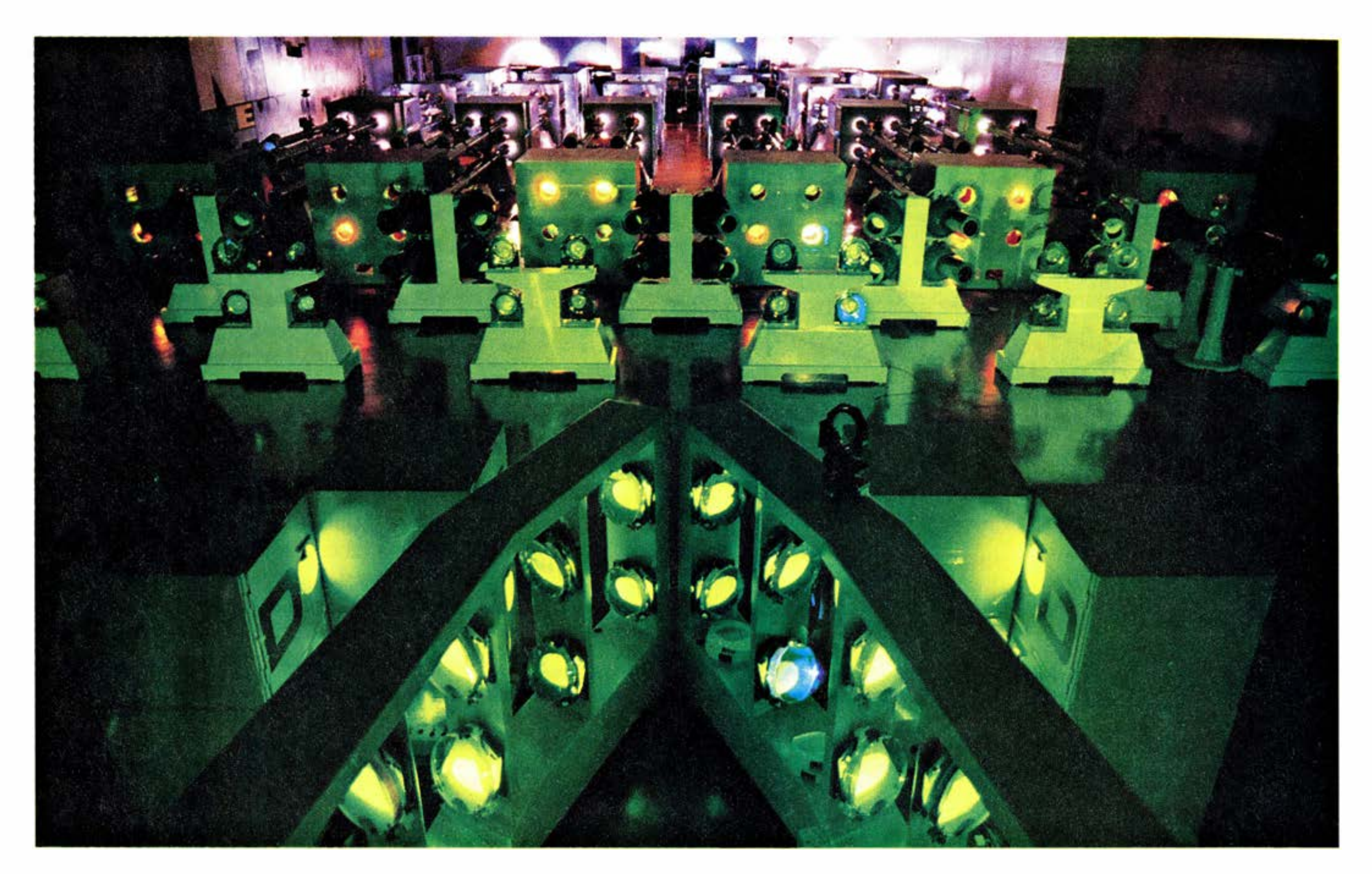


8. EVOLUCION DE LA IMPLOSION de una pastilla esférica de combustible, recubierta de vidrio, tras ser iluminada uniformemente por el láser OMEGA, según queda registrada en esta imagen de colores resaltados. Una cámara de rayos X de pequeña apertura forma una imagen de la pastilla similar a la figura 7, sobre cuya imagen se dispone una pantalla con una rendija (*izquierda*). Una cámara de ranura desplaza entonces hacia la derecha la parte de la imagen que se ve a través de la rendija en una distancia que es proporcional al tiempo transcurrido durante la implosión. La imagen resultante (*imagen superior*) recoge la implosión en el espacio y en el tiempo. Poco después de iluminada la pastilla, el plasma cercano a su superficie inicial emite rayos X. Como la pastilla se está comprimiendo, la región que emite rayos X se mueve hacia el centro hasta que, en el pico de compresión, se registra un fulgurante destello de rayos X, un nanosegundo después de comenzada la implosión. La velocidad de la envoltura comprimida es de unos 320 kilómetros por segundo.

¿Cómo conseguir altas compresiones?

En el diseño de la fusión por láser, además del requisito de una corta longitud de onda para los haces incidentes, son cruciales otras dos exigencias si queremos obtener altas compresiones en la pastilla; a saber: la uniformidad de iluminación y absorción de los haces láser incidentes y la estabilidad hidrodinámica en la implosión de la pastilla.

La uniformidad en la iluminación y absorción importa por razones de índole geométrica. Si el radio de la cáscara comprimida debe disminuir en un factor treinta, la velocidad de implo-



9. DESDOBLAMIENTO DEL HAZ, su amplificación y el triplicado de frecuencias del láser OMEGA se llevan a cabo en la gran sala que se muestra en esta fotografía, obtenida por Eugene Kowaluk, de la Universidad de Rochester. Las zonas brillantes en la pared del fondo (50 metros de la cámara) están producidas por las lámparas de destello que alimentan los amplificadores del láser. Los haces láser son infrarrojos y, por tanto, invisibles, y se convierten en luz ultravioleta invisible mediante los cristales de los seis módulos. La luz visible que emiten algunos módulos procede de las lámparas de calefacción que se encienden intermitentemente para mantener los cristales a temperatura constante. La luz verde residual de la conversión causa el resplandor verde. Los haces salen de los módulos en grupos de cuatro. Tras medir su energía, se reflejan hacia el área del blanco mediante los espejos que aparecen en la parte inferior de la fotografía.

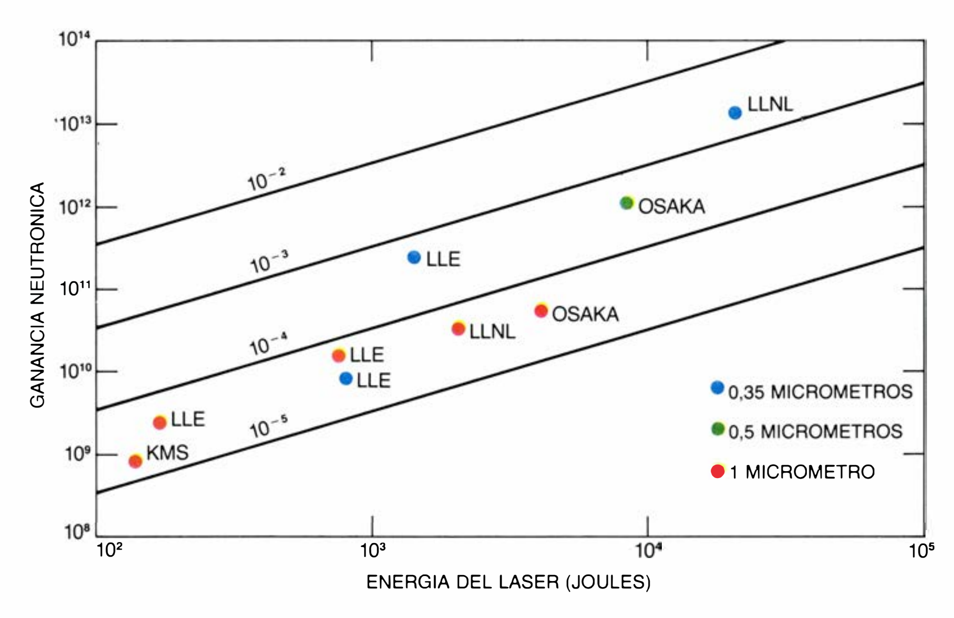
sión habrá de ser uniforme sobre la superficie de la cáscara en una parte en sesenta, aproximadamente. Este requisito limita las fluctuaciones permisibles en la intensidad de la irradiación láser, en la superficie de la pastilla en una o dos partes sobre cien.

¿Cuántos haces son necesarios y cómo hay que distribuirlos alrededor de la pastilla? En sistemas láser que utilizan cuatro, seis, ocho, doce o veinte haces, se sitúa cada uno de ellos en el centro de una cara de uno de los cinco sólidos platónicos (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro) y se dirigen perpendicularmente hacia el centro de la cara. Los haces se disponen entonces simétricamente, rodeando la pastilla que se halla en el centro del sólido platónico. El láser de frecuencia doblada VULCAN, del Laboratorio Rutherford en Appleton, Inglaterra, y el láser GEKKO-XII, en Osaka, emplean simetría dodecaédrica. Cuando la cifra de haces supera el número 20, o, en otras palabras, es mayor que el número de caras de un icosaedro regular, se determina la geometría idónea con el fin de maximizar la uniformidad en la iluminación. Un sistema de 32 haces, por ejemplo, se repartirá siguiendo la configuración de las 32 caras pentagonales y hexagonales de un balón de fútbol.

La disposición simétrica de los haces circundantes no garantiza, sin embargo, la irradiación uniforme de la pastilla: no todos los puntos de un hemisferio de la pastilla sufren igual irradiación por parte de un determinado haz. La uniformidad accesible en la irradiación aumenta con el número de haces, a expensas del aumento consiguiente en la complejidad del láser. El número de haces resultará, pues, del compromiso entre uniformidad y complejidad. Un compromiso plausible podría alcanzarse con el sistema de 32 haces.

La calidad óptica de cada haz y el balance de energía entre haces intervienen también en la uniformidad de la irradiación. En nuestro laboratorio, hemos insistido en la producción de haces láser con una sección eficaz uniforme, y hemos logrado reducir las variaciones de intensidad en el perfil del haz a menos de un diez por ciento. Otros métodos para aumentar la uniformidad en la iluminación se han propuesto en Osaka y en el Laboratorio de Investigaciones Navales de Washington. En ambos métodos, sistemas ópticos cercanos a la lente de focalización descomponen cada haz inicial en muchos hacecillos: unos 400. Cada hacecillo posee una fase al azar y, cada uno también, reparte su energía sobre un hemisferio completo de la pastilla. Cualquier heterogeneidad espacial de un haz en la lente de focalización queda, entonces, promediada sobre toda la superficie de la pastilla. Los resultados provisionales de ambos laboratorios muestran que este método mejora la uniformidad de la irradiación.

Otro objetivo que se propone el estudio de la fusión por láser: conocer y controlar las inestabilidades hidrodinámicas en las pastillas de combustible. Cuando la cápsula que implosiona se decelera inmediatamente antes del pico de compresión del combustible, el denso fluido del revestimiento de plasma puede penetrar, formando espigas, y mezclarse con el combustible de deuterio y tritio. Al mismo tiempo, el combustible puede invadir, en forma de burbujas, el plasma denso. Esta inestabilidad recuerda otro fenómeno



10. LA GANANCIA NEUTRONICA obtenida con distintos sistemas láser depende, esencialmente, de la longitud de onda, de la energía y de la simetría de los haces incidentes. Las rectas de la gráfica indican la ganancia energética de la pastilla: la energía de fusión que se produce, dividida por la energía del láser incidente. Los resultados provienen de la empresa KMS Fusion, de Ann Arbor (Michigan) (KMS), del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL), del Laboratorio de Energética de Láseres de la Universidad de Rochester (LLE) y del Instituto de Ingeniería de Láseres de Osaka, Japón (OSAKA).

que se produce en fluidos incompresibles: la inestabilidad de Rayleigh-Taylor, en virtud de la cual un fluido más denso desciende bajo otro menos denso. La inestabilidad se dispara merced a las desigualdades en la irradiación –falta de homogeneidad de la misma– o gracias a las deficiencias en el tamaño o en la composición de las pastillas, especialmente cuando dichas imperfecciones son pequeñas. La superficie de ablación, exterior al revestimiento, puede también devenir inestable hidrodinámicamente a medida que la implosión se acelera. Esta inestabilidad puede romper el revestimiento o envoltura, mezclar el combustible con la cáscara y rebajar el pico de compresión. Lo que podría terminar en pérdidas del rendimiento termonuclear, si no en su aniquilación.

Las simulaciones unidimensionales y dotadas de simetría esférica nos enseñan que la mayor compresión se alcanza en pastillas cuyo radio sea grande en comparación con el espesor de la envoltura. Pero, en ese caso, la inestabilidad hidrodinámica reviste mayor peligro potencial. Un diseño realista de la pastilla entraña un compromiso entre la finura deseable del revestimiento y las ligaduras que imponen los condicionantes de uniformidad y estabilidad. Parece conveniente asegurarse de que la envoltura, durante la implosión, no rebase, en su finura, cierto pequeño tanto por ciento del radio de la pastilla.

Actualmente, dos diseños merecen trato preferente. Las envolturas de nuestras simulaciones son de plástico y contienen una capa interior criogénica de deuterio y tritio líquidos. El interior de la envoltura se llena con deuterio y tritio gaseosos, a densidad baja y a la presión de vapor del líquido criogénico. El uso de plásticos con elementos atómicos ligeros limita la emisión de radiación desde la corona de plasma, emisión que podría precalentar el combustible. Al estar la pastilla criogénica virtualmente vacía, la envoltura puede acelerarse libremente hacia el interior hasta que, en los últimos momentos, su energía cinética se convierte en calor.

Aludamos brevemente a un diseño alternativo de pastillas que se basa en la respuesta de los materiales de alto número atómico a la radiación láser. Se coloca la pastilla de combustible en la llamada funda de radiación, fabricada en oro u otro material parecido. Cuando se irradia con láser el interior de la funda de oro, una fracción importante de la energía incidente se transforma en rayos X. Estos irradian entonces la pastilla y provocan su implosión uniforme. Este diseño alternativo se conoce como inducción indirecta, ya que el láser no irradia directamente la cápsula, como en el primer diseño.

Simulaciones por ordenador

Concluiremos con la descripción de las simulaciones por ordenador de la reacción de una pastilla de combustible que podría llegar a usarse en reactores comerciales, irradiada con un láser de fluoruro de kriptón, cuya energía es de 1,6 millones de joule y cuya longitud de onda es de un cuarto de micrometro (un joule es la energía necesaria para levantar un kilogramo unos diez centímetros, aproximadamente). En nuestras simulaciones, la energía del láser se deposita a una potencia promedio de 3×10^{14} watt en un pulso cuya intensidad crece constantemente durante cinco a diez nanosegundos. La intensidad del pulso se mantiene lo suficientemente baja y así evita que se genere un número importante de electrones supratérmicos en la corona de plasma.

Una medida importante de la respuesta de la pastilla al láser es la llamada relación de convergencia de la chispa, el cociente entre el radio inicial del material en ignición y el radio final. Para mantener la estabilidad de la pastilla, la relación no debe ser demasiado grande; nosotros tomamos una relación cercana a cincuenta unidades. En nuestros modelos imponemos, entonces, ciertas discrepancias, punto a punto, en la iluminación de la pastilla con el láser. Puesto que la frontera entre la envoltura y el combustible se decelera casi en el mismo instante en que aparece el pico de compresión, las variaciones de presión y el aumento de las inestabilidades hidrodinámicas producen una configuración muy compleja en las densidades cerca del núcleo [*véase la figura 11*].

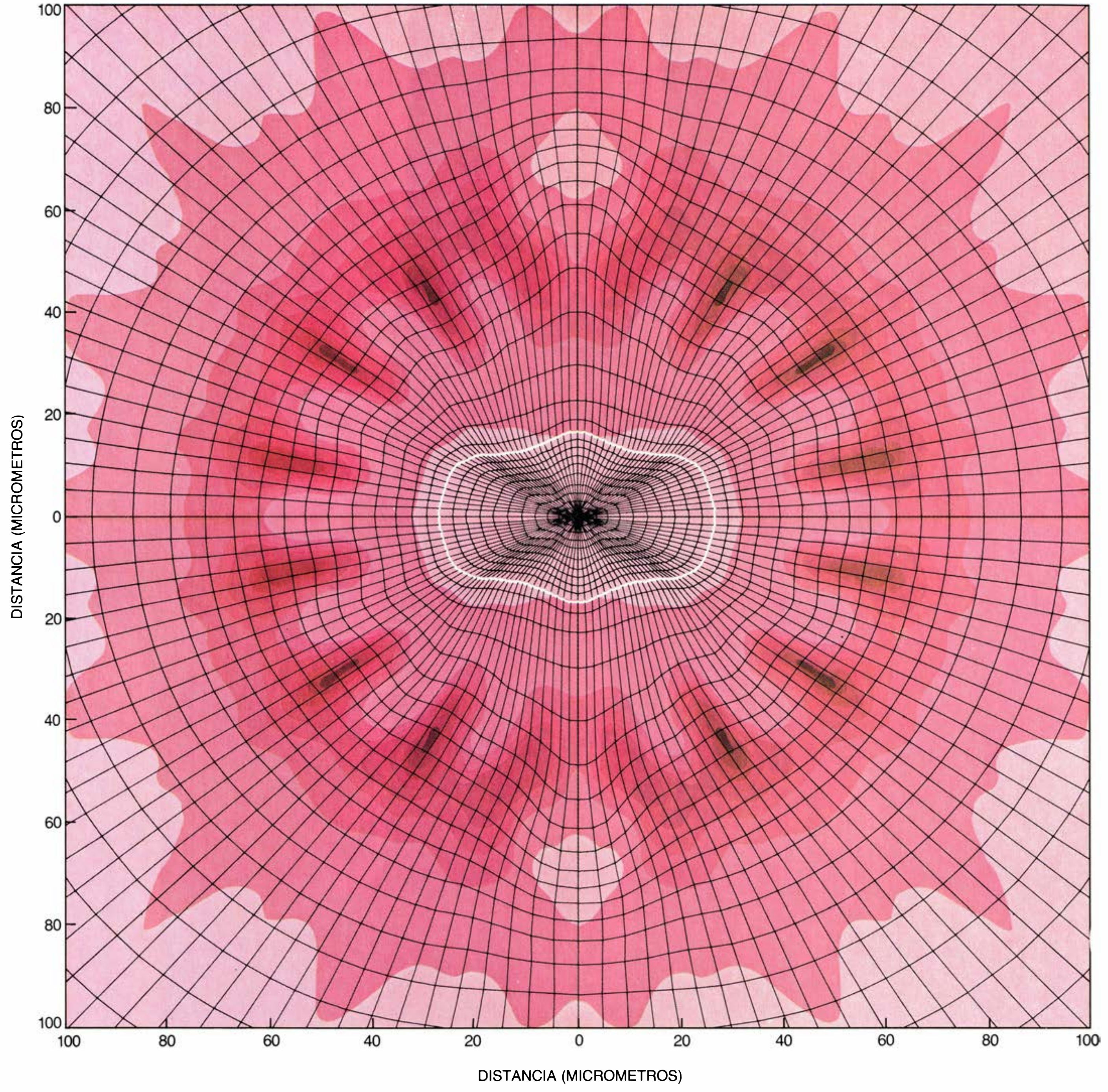
Las partículas alfa emitidas por la combustión termonuclear en la región de la chispa comienza a depositar su energía en el resto de la capa de combustible. Se logra la ignición termonuclear cuando el producto de la densidad por el radio de la región de ignición crece hasta valores suficientes para frenar a la mayoría de las partículas alfa. La temperatura en la región de ignición alcanza, aproximadamente, unos 100 millones de grados; la temperatura del resto del combustible es de alrededor de 30 millones de grados. La combustión termonuclear avanza radialmente hacia el exterior del combustible, el perfil de temperatura se hace más suave y, a medida que el combustible se consume, el frente de combustión se torna casi esférico. La cápsula se deshace y se extingue el fuego termonuclear.

Resultados

Según nuestras simulaciones, en las que hemos ido considerando un amplio elenco de desigualdades en la irradiación, la energía termonuclear obtenida suele centuplicar la energía incidente del láser. Estos resultados avalan una

renovada confianza en la posibilidad de la fusión mediante láser. Se podría lograr una planta que generara casi mil millones de watt con la combustión de diez pastillas de combustible por segundo, si el rendimiento total del láser fuera del 15 por ciento, aproximadamente. Tomando estos cálculos como referencia, cabe esperar que un láser que emita una energía de más de 1,6 millones de joule y menos de 10 millones, resulte apropiado para un reactor.

A modo de resumen: se han logrado progresos considerables en el conocimiento de la física de la fusión por láser y ha quedado claro cuán necesario sea conseguir longitudes de onda más cortas. Los resultados experimentales de los años venideros podrían traernos la respuesta a la pregunta fundamental que hoy tiene planteada la fusión por láser: ¿se conseguirá la ignición? Una respuesta afirmativa conllevaría el anuncio de una abundante energía de fusión en el siglo XXI, un paso importante que nos acercaría a su realización práctica.



11. SIMULACION POR ORDENADOR de la implosión de una pastilla de combustible diseñada para un reactor. Nos pone de relieve el efecto de las desigualdades en la irradiación en el rendimiento de la pastilla. Se supone que esas discrepancias son simétricas frente a rotaciones alrededor del eje norte-sur de la pastilla. Estas inhomogeneidades están caracterizadas por el número de máximos de intensidad de irradiación que aparecen a lo largo del círculo mayor representado por una línea de longitud de la pastilla. Esta se halla constituida por una envoltura de plástico que contiene una fría capa de deuterio y tritio líquidos y, en su interior, gas de deuterio y tritio. Cuando el gas se comprime, forma una región de chispa en la que se inicia la reacción termonuclear. En esta simulación se ha impuesto una inhomogeneidad en la irradiación de un uno por ciento. La ilustración muestra el núcleo comprimido poco antes de la ignición; las zonas más oscuras corresponden a densidades mayores. Las líneas del entramado indican la resolución con la que se ha calculado la evolución de la implosión en la cápsula. El contorno de color blanco representa la frontera entre la zona del combustible y la del gas; a esta última, corresponde la capa más interna antes de la compresión. La mayor parte del material de la figura se ha comprimido hasta 100 y 500 gramos por centímetro cúbico, es decir, entre 500 y 2500 veces la densidad del líquido. El cálculo se hizo usando el programa ORCHID, escrito por Charles P. Verdon; precisa unas diez horas en el CRAY X-MP, uno de los superordenadores más rápidos del mundo. A pesar de las desigualdades en la compresión, la ganancia por fusión centuplicó la energía del láser incidente.



El origen del maíz

El maíz actual, sostiene el autor, tiene un doble antepasado: proviene de un cruce entre un maíz primitivo y una forma perenne del teosinte silvestre. Los experimentos de hibridación apoyan su tesis

Paul C. Mangelsdorf

Siempre ha existido un halo de misterio en torno al maíz: ¿dónde y cuándo se originó? Y lo que es más importante, ¿a partir de qué? El maíz, tal como lo conocemos, es una planta totalmente domesticada. La más eficiente productora de grano entre todas las gramíneas, es incapaz de sobrevivir sin la ayuda humana, porque no tiene forma de propagar las semillas. Los granos de maíz se agarran con fuerza a la mazorca, y si se la dejara simplemente caer al suelo, brotarían tantos plantones juntos que, con toda probabilidad, ninguno llegaría a la madurez. La mazorca, con sus centenares de variedades actuales, ha sido creada por el ser humano, para sus propios fines, a lo largo de siglos de reproducción selectiva; no tiene contrapartida alguna en el mundo silvestre, o si vamos a eso, entre otras plantas cultivadas. Y, sin embargo, el maíz debe haber evolucionado, en su origen, a partir de una planta silvestre. ¿Qué planta? La pregunta ha confundido a botánicos y antropólogos por más de un siglo. Yo mismo le he dedicado mucho tiempo durante casi cincuenta años.

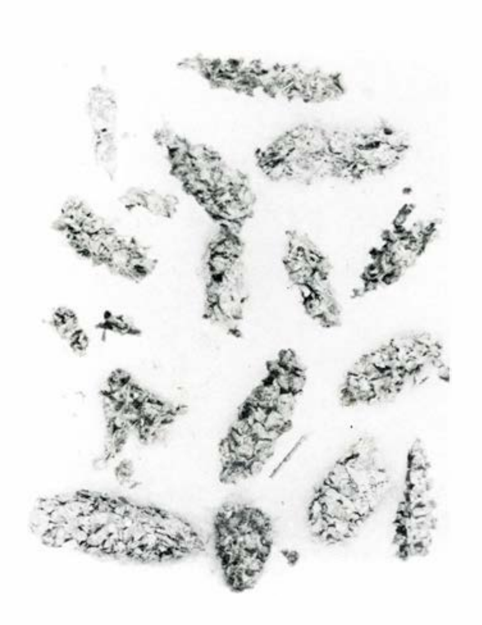
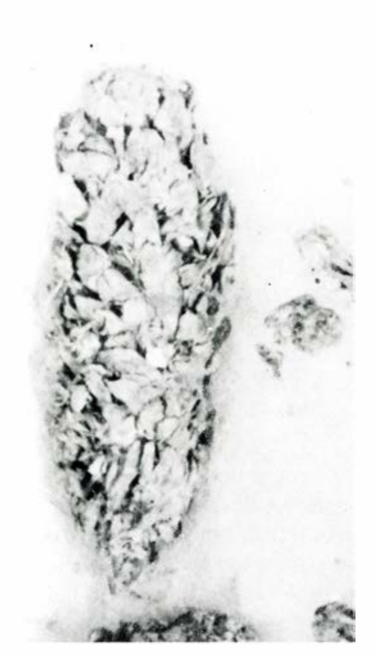
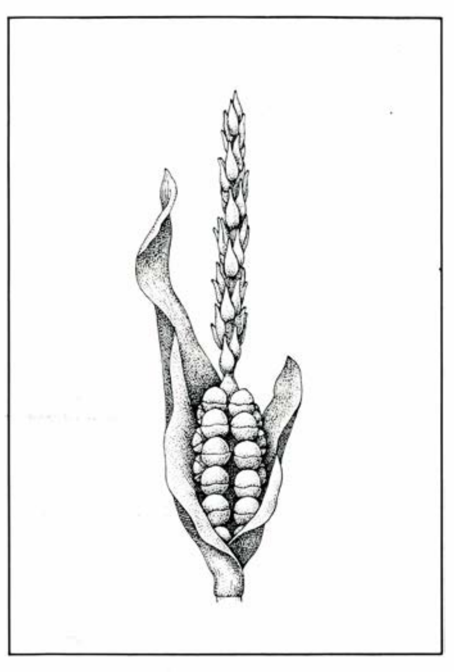
En el curso de ese intervalo, dos han sido las principales teorías acerca del misterio del origen del maíz. La más antigua, y todavía la de más amplia aceptación, sostiene que el maíz cultivado desciende de su pariente vivo más próximo: el teosinte anual, una gramínea silvestre que vive en México y América Central. En 1939, Robert G. Reeves y yo adelantábamos una hipótesis absolutamente distinta. Proponíamos que el antecesor del maíz cultivado fue un maíz silvestre: en concreto, una raza silvestre de maíz tunicado, que es una forma peculiar, primitiva, cuyos granos están encerrados, uno por uno, en vainas desechables o glumas. El maíz tunicado silvestre, hoy día probablemente extinto, sería además un maíz duro, es decir, tendría el grano pequeño y duro. En este guión, el teosinte anual, lejos de ser un antecesor del maíz, provendría él mismo de la hibridación del maíz con *Tripsacum*, el único otro pariente gramíneo, americano.

Cuarenta y siete años después, sigo creyendo que el maíz moderno adquirió sus características botánicas específicas, sobre todo la mazorca, a partir de un maíz duro tunicado, silvestre. No obstante, dos datos nuevos han obligado a importantes cambios en la teoría que Reeves y yo propusimos originalmente. Primero, ha quedado claro, en particular por comparación de la estructura del polen, que el teosinte anual no puede ser un producto híbrido de maíz y *Tripsacum*. Segundo, en 1979 se descubrió una variedad nueva de teosinte que, merced a tallos subterráneos (rizomas) y robustas raíces, es una planta perenne en vez de anual. (La planta perenne sobrevive de un año para otro, mientras que la anual, como el maíz, completa su ciclo biológico en una sola temporada.) En mi opinión, este teosinte perenne, denominado *Zea diploperennis*, es el eslabón que faltaba en la genealogía de ambos: el maíz (*Zea mays*) y el teosinte anual (*Zea mexicana*).

Tal como lo veo ahora, el maíz moderno y el teosinte anual descienden por hibridación del teosinte perenne con un maíz duro tunicado, primitivo. Esta versión revisada de la teoría cuenta con el apoyo decidido de los resultados de los experimentos de cruzamiento. Estos experimentos indican que el teosinte anual es, como siempre he sostenido, progenie híbrida, que no progenitor, del maíz, y que el otro padre es *Z. diploperennis* en vez de *Tripsacum*. Y el maíz moderno, si bien ha heredado sus características botánicas específicas de un pariente silvestre del maíz, también ha recibido una contribución igualmente importante de *Z. diploperennis*. A decir verdad, fue la hibridación con teosinte perenne, hace probablemente unos 4000 años, lo que disparó la evolución explosiva del maíz como planta cultivada.

Con anterioridad, el maíz era ya el cultivo más importante de las Américas, como lo es hoy todavía. Además, ya no cabe duda alguna que es americano en su origen. El mejor testimonio es el arqueológico. Más que cualquier otra planta, el maíz documenta su propia historia, porque sus duras espigas están bien diseñadas para la conservación bajo condiciones muy diversas. Se han encontrado restos de maíz prehistórico, que incluyen unas 25.000 mazorcas, en numerosos lugares desde Arizona hasta Guatemala; en cambio, no se ha hallado una sola mazorca inequívocamente anterior a 1492, en ningún lugar del Viejo Mundo. Fue Cristóbal Colón quien descubrió el maíz en Cuba y lo trajo a España. En el curso de una generación, se había

1. MAZORCAS del maíz actual: varían enormemente de una raza a otra en forma, tamaño y color. La rica diversidad del maíz moderno es el resultado de siglos y siglos de cruzamiento y mejora selectiva. En último término, según apunta el autor, cabe atribuir la diversidad a la hibridación, hace unos 4000 años, de un maíz primitivo, cultivado, con un teosinte silvestre, perenne. La hibridación puso en manos de los campesinos un rico acervo génico con el que trabajar, e hizo del maíz una especie más mutable (y por tanto más maleable). La mazorca del ángulo inferior derecho es la "mellada de Corn Belt", estadounidense, el maíz más productivo del mundo. A su izquierda, una mazorca de "Gigante de Cuzco", raza peruana con los mayores granos del mundo. Encima de la cuzqueña, la variedad "Lady Finger", un diminuto trigo duro; y encima de éste, la blanquecina mazorca de un trigo tunicado brasileño cuyos granos están encerrados en una vaina.

2. MAZORCAS FÓSILES halladas en una caverna del valle de Tehuacán, México; datan de unos 5000 años a. C., y son las más antiguas de cuantas se han descubierto. A la izquierda, las mazorcas a tamaño natural, con la mayor aumentada en la fotografía central. Las glumas largas, desechables, que encierran los granos individuales, identifican estas mazorcas como las de un maíz tunicado; además, como los granos son pequeños, se trata probablemente de un maíz duro, silvestre quizás. El maíz moderno no puede sobrevivir en la naturaleza porque la espiga es dura y está herméticamente envuelta en brácteas; de resultas, las semillas (granos) no se pueden dispersar de forma natural y necesitan del concurso del hombre. La minúscula espiga de maíz silvestre, reconstruida en el dibujo, debió ser más frágil y, al madurar, las vainas se abrirían, permitiendo la dispersión de los granos. Dibujo basado en otro de Walton C. Galinat.

propagado por toda Europa; al cabo de dos se plantaba por todo el mundo, en toda región adecuada para su cultivo. Sólo otros dos productos del Nuevo Mundo, el tabaco y la sífilis, se difundieron con igual rapidez.

Por la época en que Colón encontraba el maíz, los indios lo plantaban desde Canadá hasta Chile. El maíz era la base de todas las culturas precolombinas avanzadas, entre ellas la de los indios de Suramérica y los mayas y aztecas de América Central y México, pero su domesticación data de mucho antes del florecimiento de estas civilizaciones. Las muestras de maíz más antiguas se remontan a unos 5000 años a. C. Con sólo unos centímetros de longitud, fueron descubiertas en las áridas cavernas, otrora habitadas, del valle de Tehuacán, al sureste de Ciudad de México, por el arqueólogo Richard S. MacNeish, de la Universidad norteamericana de Boston.

En los años sesenta, estudié detenidamente esas muestras con Walton C. Galinat, que a la sazón era mi ayudante y ahora está en la Suburban Experiment Station, de la Universidad de Massachusetts en Waltham. Concluimos que las mazorcas más antiguas eran de maíz silvestre y que, por consiguiente, esta gramínea debió ser domesticada poco después de los 5000 años a. C. Las diminutas mazorcas, aunque asegmentadas como las del maíz moderno, parecían suficientemente frágiles para permitir que las semillas se dispersaran y la planta sobreviviera en la naturaleza. Otros investigadores posteriores arguyeron que las mazorcas de Tehuacán eran de un maíz cultivado primitivo. Pero todo el mundo convendrá en que constituyen un testimonio irrecusable de la existencia, hace 7000 años, de una planta con todos los caracteres botánicos específicos del maíz moderno. La principal diferencia entre el de Tehuacán y el moderno es de tamaño.

Así pues, hoy día se puede dar una respuesta definitiva a la primera de las preguntas que yo planteaba: dónde y cuándo apareció el maíz como variedad moderna, domesticada. Según constata MacNeish en un artículo reciente, "el maíz fue domesticado en una pequeña región de México, al norte de Chiapas y sur de Ciudad de México". Sean de maíz silvestre las mazorcas arqueológicas más antiguas o sean de un maíz cultivado primitivo, lo que parece seguro es que, como señala MacNeish, "el maíz ya estaba domesticado mucho antes que el 4000 a. C.".

No existe un consenso similar acerca de la tercera pregunta, la de la ascendencia del maíz. La teoría de que el maíz proviene del teosinte anual viene siendo muy popular desde finales de los años sesenta, momento en que revivió en parte gracias al trabajo de George W. Beadle, de la Universidad de Chicago [véase "El origen del maíz", por George W. Beadle; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1980].

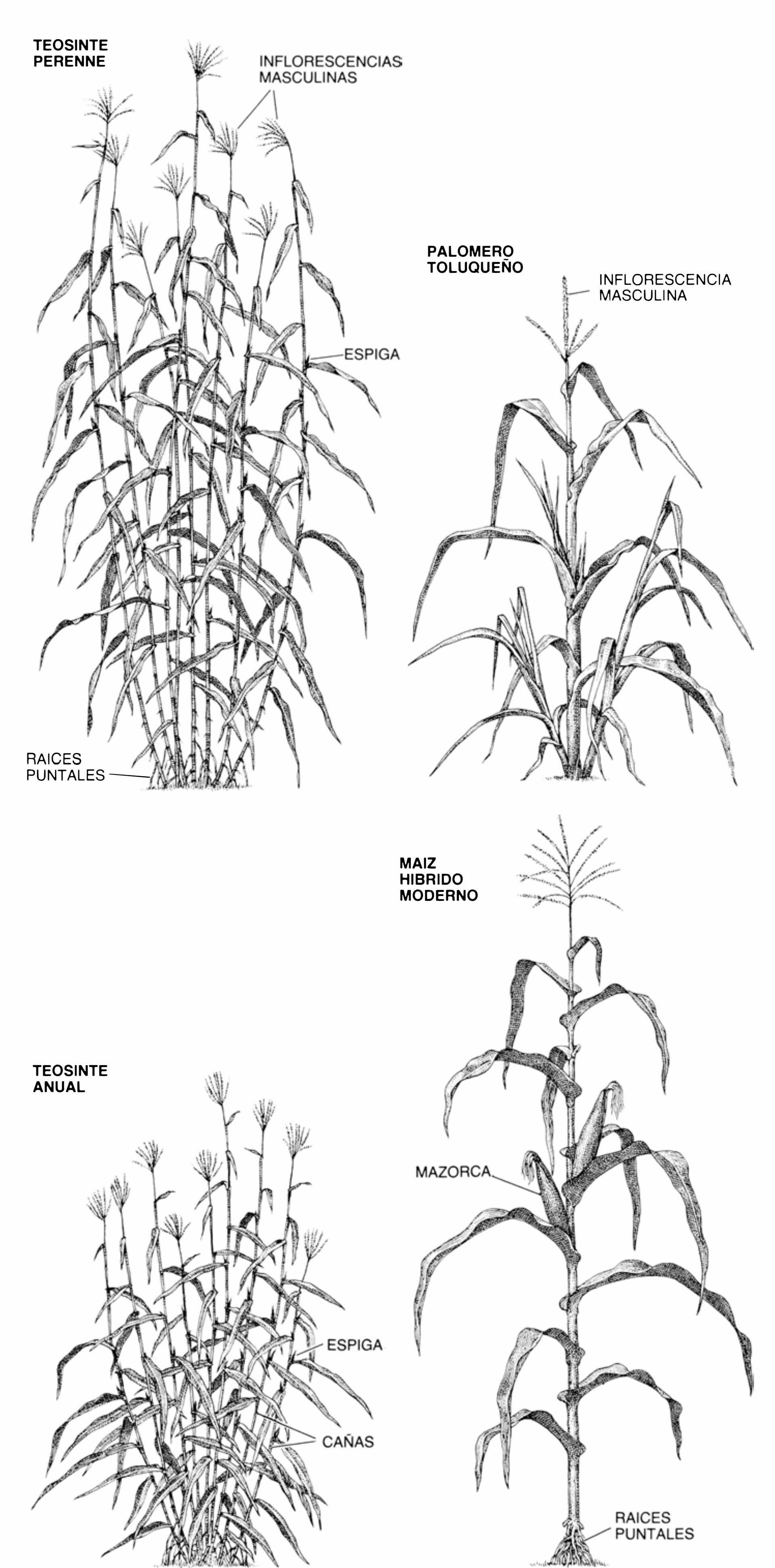
La razón principal para dar crédito a esta teoría es el estrecho parentesco genético entre el maíz cultivado y el teosinte anual, hoy día incuestionable. Ambas plantas tienen 10 pares de cromosomas homólogos (funcionalmente idénticos) y se hibridan sin traba alguna. Por lo común, los híbridos son muy fértiles (a diferencia del mulo, por poner un ejemplo, que es un híbrido de especies con parentesco más lejano). Cuando un híbrido maíz-teosinte forma células sexuales mediante el proceso de división celular conocido por meiosis, cada par de cromosomas homólogos –uno del maíz, otro del teosinte– se empareja casi gen a gen. Además, los cromosomas así emparejados intercambian genes, con parecida frecuencia, en los híbridos y en el propio maíz. La existencia de esta recombinación indica que debe haber una estrechísima similitud entre las secuencias genéticas de los dos cromosomas.

Sin embargo, la teoría del teosinte sobre el origen del maíz tiene defectos, y graves. La mayoría de sus versiones sostiene que el teosinte fue domesticado por los indios y se convirtió gradualmente en maíz por reproducción selectiva. No obstante, no existe indi-

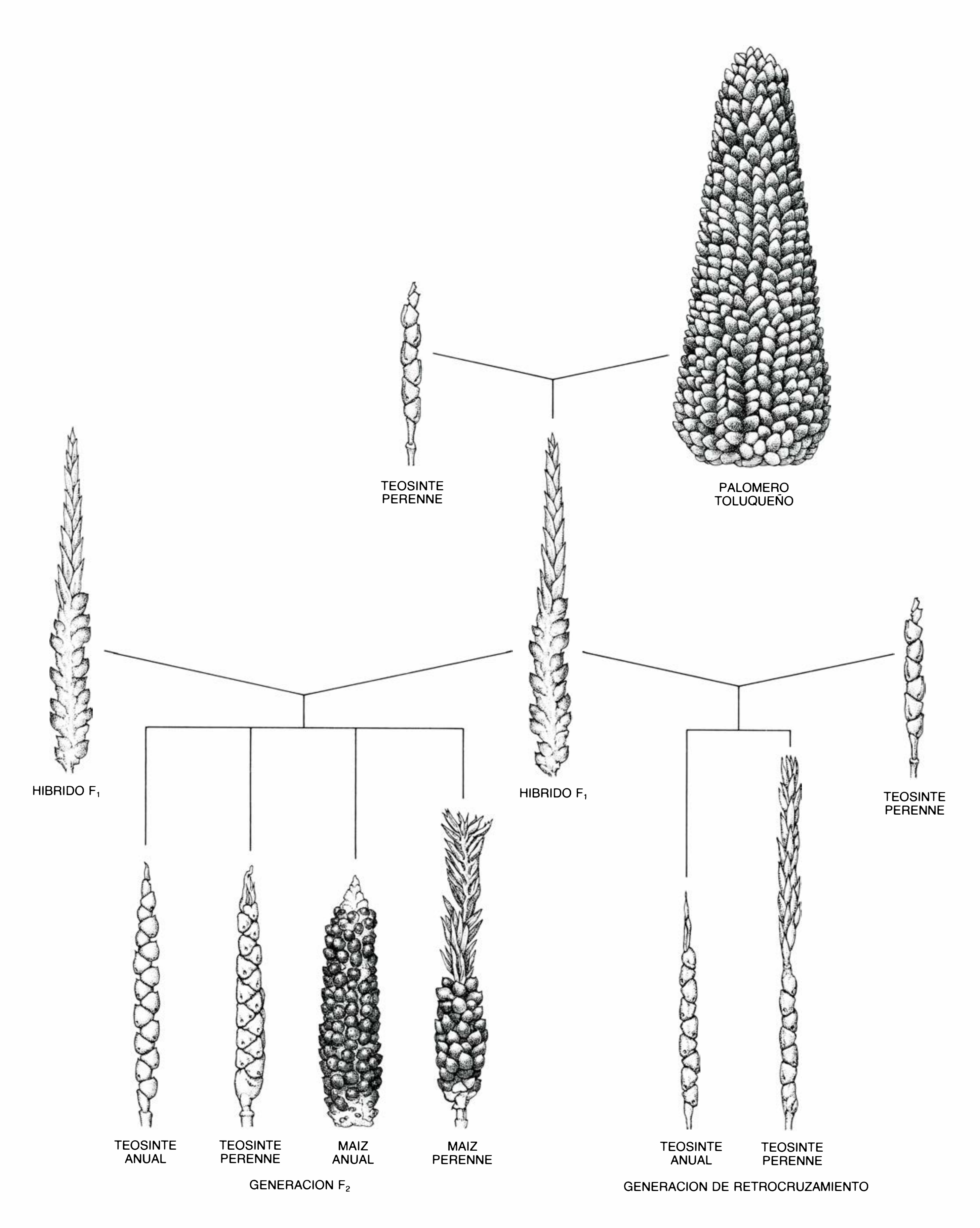
cio tangible de ningún género –arqueológico, etnológico, lingüístico, ideológico, pictórico o histórico– que demuestre que los indios cultivaran alguna vez teosinte. De nuevo, los datos más significativos son arqueológicos. En contraste con los miles de muestras de maíz halladas, sólo unos pocos fragmentos de teosinte han aparecido en algunos yacimientos arqueológicos primitivos. Además, en esos yacimientos en los que se ha encontrado maíz y fragmentos de teosinte, o de híbridos de teosinte, el maíz ha resultado ser, sistemáticamente, más antiguo que los restos de teosinte. "Se podría decir que no hay un solo grano de teosinte anterior al maíz", ha escrito MacNeish, "ni una sola pizca de evidencia que respalde la afirmación de que el teosinte evolucionó hacia maíz...".

La variante más reciente de la teoría del teosinte –adelantada por Hugh H. Iltis, de la Universidad de Winconsin en Madison– choca también con el registro arqueológico. La hipótesis de Iltis demuestra una brillante imaginación al intentar explicar cómo la rígida mazorca del maíz, con sus múltiples hileras longitudinales de granos, podría haber evolucionado a partir del teosinte, cuyo propio órgano femenino (la espiga), portador de las semillas, es pequeño, quebradizo, está segmentado y tiene sólo dos hileras. Iltis opina que la mazorca de maíz evolucionó merced a una "transmutación sexual catastrófica", pero no a partir de la espiga del teosinte, sino de su inflorescencia masculina, portadora del polen. El problema es que el registro arqueológico no ofrece ningún testimonio de que el teosinte anual existiera siquiera cuando se supone que tuvo que darse el cambio catastrófico.

Un problema adicional de todas las variantes de la teoría del teosinte es



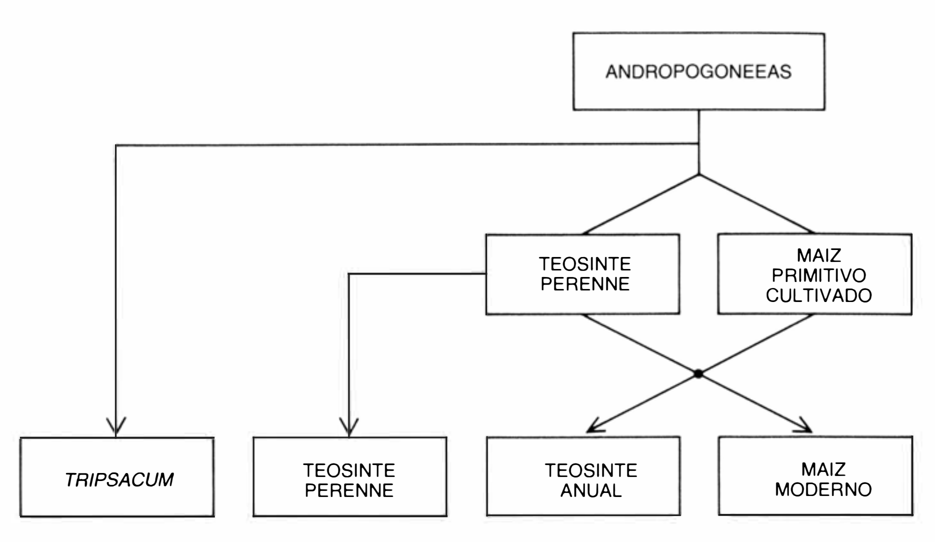
3. MAÍZ Y TEOSINTE. Están estrechamente emparentados: tienen el mismo número de cromosomas y se hibridan sin traba alguna. En ambos, las inflorescencias masculinas son independientes de los órganos femeninos, portadores de semillas. Las plantas difieren, sobre todo, por la naturaleza de los órganos femeninos. Mientras que el maíz desarrolla dos o tres mazorcas grandes, resistentes, el teosinte presenta gran cantidad de espigas pequeñas, frágiles, que se rompen en la maduración. Añádese que el teosinte tiene numerosas cañas o tallos laterales. Muchos investigadores creen que el maíz cultivado en la actualidad proviene del teosinte anual que crece silvestre en México y Guatemala. En cambio, el autor defiende aquí que tanto el maíz moderno como el teosinte anual provienen de un cruce entre un primitivo maíz cultivado –probablemente el maíz duro mexicano conocido como palomero toluqueño o su precursor– y el teosinte perenne, *Zea diploperennis*.



4. EXPERIMENTOS DE CRUZAMIENTO en apoyo de la hipótesis del autor sobre el origen del maíz moderno y el teosinte anual. Se muestran ejemplos de las espigas o mazorcas utilizadas en los experimentos, a dos tercios de su tamaño real. Se cruzó palomero toluqueño, un maíz duro primitivo, con teosinte perenne. Luego se cruzaron híbridos F_1 (de la primera generación) entre sí y con teosinte perenne (retrocruzamiento). Ambas generaciones, la F_2 y la de retrocruzamiento, contenían teosinte anual cuyas espigas segmentadas son quebradizas y tienen dos hileras de granos entrelazados. En la generación F_2 también había maíz anual, con las mazorcas asegmentadas y múltiples hileras de granos. Subproducto de los experimentos fue el maíz perenne, que ha sido pregonado como un valioso cultivo nuevo. El autor lo considera de dudoso valor: al crecer de continuo en el mismo terreno, sería vulnerable a los insectos y enfermedades.

que no tienen en cuenta el hallazgo de *Z. diploperennis*, hallazgo en el que, paradójicamente, Iltis desempeñó un papel importante. Fue un graduando mexicano, Rafael Guzmán, quien descubrió que la planta crecía en estado silvestre en Jalisco, pero era Iltis quien había organizado la búsqueda del teosinte perenne. Aunque se conocía desde antes una especie distinta del teosinte perenne, esa especie era tetraploide y no diploide, lo que significaba que sus células contenían cuatro copias de cada cromosoma en lugar de dos, que es lo más corriente. John F. Doebley, colega de Iltis, demostró que *Z. diploperennis* es diploide. Y lo que es más importante, porta el mismo número de cromosomas que el maíz y da híbridos fértiles con él (mientras que los de maíz y el teosinte perenne tetraploide son "triploides", con tendencia a la esterilidad).

El descubrimiento del nuevo teosinte perenne cambió de manera drástica los términos del debate sobre la genealogía del maíz y el teosinte. Cuando se dio a conocer el hallazgo en 1979, H. Garrison Wilkes –antiguo alumno mío, hoy en la Universidad de Massachusetts en Boston– se percató de inmediato de su importancia. Y planteó la hipótesis de que la hibridación del teosinte perenne diploide con una raza de maíz cultivado, en una fase temprana de la domesticación, podría haber originado las diversas razas de teosinte anual. La hipótesis de Wilkes me cautivó en seguida, en parte porque era coherente con los testimonios arqueológicos y en parte porque se podía verificar por medio de experimentos de hibridación. Fue para mí un enérgico incentivo para reemprender la investigación experimental que había abandonado más de diez años atrás.



5. LA GENEALOGÍA esquematiza el origen del maíz y su relación con las gramíneas silvestres teosinte y *Tripsacum*. Las tres plantas descienden de un antecesor remoto que probablemente perteneció a las Andropogoneeas, tribu que incluye el sorgo y la caña de azúcar. En algún momento anterior al 4000 a. C., se domesticó maíz en México a partir de un antecesor silvestre que ya tenía las características botánicas del maíz moderno –en especial, una mazorca consistente, con múltiples hileras de granos. Hace unos 2000 años a. C., un primitivo maíz cultivado se hibridó con teosinte perenne. El resultado incluía teosinte anual y razas de maíz vigorosas y productivas. A la larga, el maíz silvestre, ahogado por el cultivado, se extinguió.

El maíz primitivo con el que se hibridó *Z. diploperennis* tuvo que ser un maíz tunicado. Los granos de maíz más primitivos, en particular los de las cavernas de Tehuacán, llevan la gluma larga, blanda, como barcia, característica del maíz tunicado. Al tener los granos envueltos en una vaina, el maíz tunicado se parece a otros importantes cereales y a la casi totalidad de las restantes gramíneas, silvestres o domesticadas; el maíz cultivado moderno es único con su grano desnudo. Este dato por sí solo señala que el maíz tunicado es primitivo, como ya sugiriese, en 1829, el botánico francés Auguste de Saint-Hilaire. Creía éste que el carácter de la vaina tendió a desaparecer durante la domesticación, y parece evidente que andaba en lo cierto. Hasta los investigadores que defienden que el maíz evolucionó a partir del teosinte anual aceptan, por lo general, el hecho de que los maíces más primitivos fueran tunicados.

Para verificar la hipótesis de Wilkes, decidí cruzar *Z. diploperennis* con palomero toluqueño, un maíz duro mexicano. El palomero toluqueño no es un maíz tunicado –sus granos pequeños, pétreos, no están envainados–, aunque se trata de una raza primitiva que no parece muy alejada del maíz tunicado. Cabe que él o su precursor tunicado se plantaran en Jalisco, donde se descubrió *Z. diploperennis*, por la época en que se iniciaba el cultivo del maíz.

A pesar de ser primitivo, el palomero toluqueño posee cuatro características botánicas específicas del maíz moderno. Primera, es una planta anual. Segunda, tiene los raquis duros, no segmentados. Tercera, las "espiguillas" que se convierten en granos en la mazorca, y en flores portadoras de polen en la inflorescencia masculina, se presentan por parejas. Cuarta, la mazorca tiene muchas hileras de granos. En cambio, *Z. diploperennis* es perenne; lo mismo que el teosinte anual, tiene los raquis quebradizos, segmentados, que se deshacen cuando están maduros; presenta, además, espiguillas solitarias y sólo dos filas de granos.

Mi comprobación experimental de la hipótesis de Wilkes empezó a principios de 1979, cuando cultivé plantas de *Z. diploperennis* y de palomero toluqueño en mi pequeño jardín de Chapel Hill. Al florecer las plantas en junio, las crucé con éxito, empleando el teosinte como elemento femenino y fertilizándolo con polen extraído del trigo duro mexicano. Las semillas híbridas maduraron a finales de verano, y para obtener una generación envié algunas a Argentina, donde comenzaba la primavera. Allí, un antiguo colega, Julián Cámara Hernández, de la Universidad de Buenos Aires, las plantó.

Cuando las plantas híbridas, miembros de la generación F_1 (primera generación filial), florecieron a principios del año siguiente, Cámara Hernández las cruzó entre sí para producir una generación F_2. Además, retrocruzó los híbridos de la F_1 con el padre teosinte perenne. Como los teosintes anuales difieren del perenne, sobre todo, por ser anuales, y comparten por lo demás idénticas características botánicas, debieron surgir en una población retrocruzada, que tendería a mostrar una proporción más alta de genes de teosinte que cualquiera de las poblaciones F_1 o F_2.

En realidad, ambas poblaciones, la retrocruzada y la F_2, contenían cantidades significativas de plantas de teosinte anuales. Estos resultados fueron posteriormente confirmados en Texas mediante plantación de F_2 y retrocruzados, plantación en la que se me unieron dos antiguos alumnos, Lewis M. Roberts y John S. Rogers (ambos también retirados). En conjunto, los ex-

perimentos brindaban un fuerte apoyo a la hipótesis de Wilkes, en el sentido de que el teosinte anual es un producto híbrido del teosinte perenne y el maíz. A lo largo de su desarrollo, me confirmaron en mi vieja creencia de que el teosinte anual no podía ser antepasado del maíz.

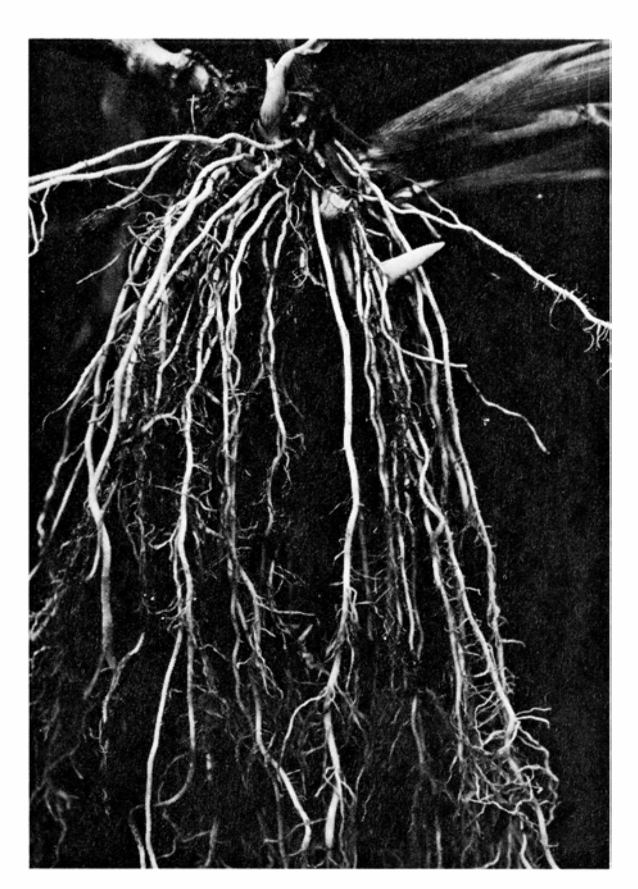
En cambio, de dos observaciones que hicimos en los experimentos de reproducción emergió un cuadro de la ascendencia del maíz completamente distinto. Fue la primera que los rizomas del teosinte perenne, los tallos subterráneos que le permiten aguantar un año tras otro, se acompañan de raíces grandes, nuevas (conocidas como raíces puntales o tirantes); hasta cierto punto, este robusto sistema radicular se transmite a la progenie híbrida. La segunda fue que la generación F_2 incluía plantas que tenían todos los caracteres botánicos del maíz moderno.

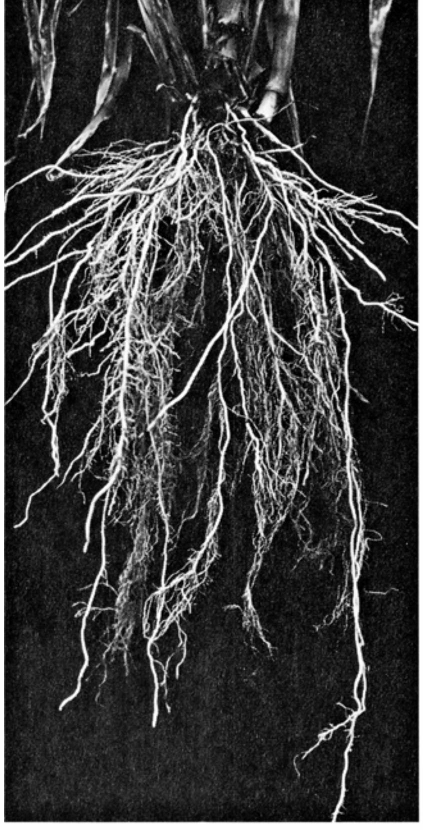
Estos hallazgos sugerían que la hibridación histórica de *Z. diploperennis* con un maíz cultivado primitivo podría haber dado lugar no sólo al teosinte anual, sino también a razas nuevas de maíz, más vigorosas y productivas que cualquiera de las precedentes. Si el palomero toluqueño sirve de ejemplo, el maíz cultivado primitivo debió ser una planta canija, con tallos y raíces débiles; sería muy susceptible a la sequía y a la humedad excesiva, así como al deterioro producido por los insectos y a las enfermedades. Puede que los indios mexicanos lo cultivaran sólo porque era mejor que otros cereales disponibles en la época, incluido el teosinte perenne. Las frágiles espigas del teosinte debían ser difíciles de cosechar, y casi la mitad de la magra recolección estaría formada por la cáscara dura e indigesta que envuelve el grano.

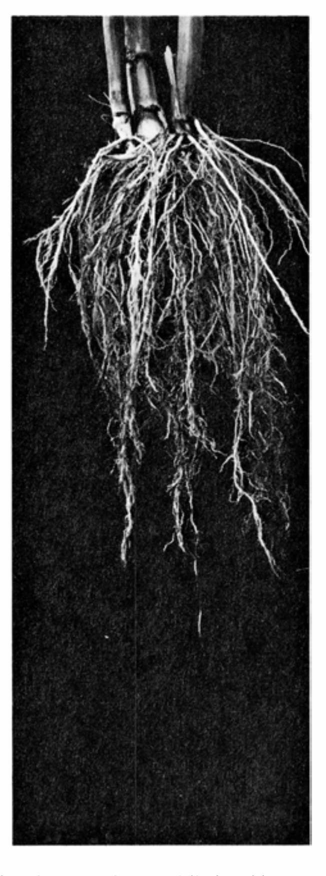
Sin embargo, si bien el teosinte perenne es inferior como cultivo, sus robustas raíces le confieren resistencia a la sequía, y aguanta asimismo muchas enfermedades a las que el maíz es sensible. En mi opinión, transmitió algunas de estas propiedades a los descendientes de su hibridación con el maíz. Fue el teosinte perenne el que brindó, al maíz moderno, un buen sistema radicular, tallos fuertes y resistencia a ciertas enfermedades. La mazorca característica, con el raquis duro y las numerosas hileras apareadas de granos, viene del maíz cultivado primitivo y, en último término, en forma rudimentaria, del maíz silvestre. Pero sin los caracteres aportados por el teosinte perenne, el maíz nunca habría llegado a convertirse en el cultivo productivo que es hoy día.

El flujo de genes del teosinte hacia el maíz no tuvo lugar de una manera instantánea. Antes bien, las diversas razas de teosinte anual, que también provenían de la hibridación (de ahí su estrecha relación genética con el maíz), continuaron transmitiendo genes de *Z. diploperennis* al maíz. Al crecer como malas hierbas en los maizales, como lo hacen todavía, los teosintes anuales se cruzaron con el maíz, generación tras generación. Aunque no son en sí los antecesores del maíz moderno, cabe considerarlos portadores de genes valiosos del teosinte perenne antecesor del maíz.

La confluencia de los dos flujos genéticos tuvo profundas repercusiones. El maíz no sólo adquirió características del teosinte perenne, sino que también se volvió más mutable. Aunque los cromosomas de los dos padres se emparejaban de forma casi regular en el curso de la meiosis, los cromosomas apareados no guardaban una correspondencia perfecta entre sí. La desalineación llevó a la creación de nuevos genes cuando los cromosomas homólogos intercambiaban segmentos por







6. SISTEMA RADICULAR del teosinte perenne (*izquierda*); incluye nuevas y gruesas raíces puntales y es mucho más robusto que el del maíz primitivo palomero toluqueño (*derecha*). Un híbrido de ambas plantas (*centro*) presenta raíces de resistencia intermedia. Esto lleva a pensar que el maíz moderno puede haber adquirido sus robustas raíces, incluidas las puntales, por hibridación con teosinte perenne, hace de ello unos 4000 años. Los vástagos cortos, pálidos, que brotan de las raíces del teosinte, son rizomas (tallos subterráneos) que permiten a la planta sobrevivir de un año para otro. (Fotografías de Bobbe Baker.)

recombinación. El resultado último fue un acervo génico tan amplio y rico en variabilidad que, a partir del mismo, podía evolucionar cualquier tipo de maíz por selección natural y artificial. Con el paso de los siglos, el hombre ha explotado hábilmente este recurso para crear centenares de variedades de maíz.

¿Cuándo se produjo el encuentro decisivo entre *Z. diploperennis* y *Z. mays*? Se puede asignar una fecha aproximada al encuentro, partiendo de la presencia más antigua en el registro fósil, de un maíz que presente indicios de hibridación con el teosinte. El más arcaico de estos maíces no supera los 3800 años de antigüedad. Suponiendo que el maíz híbrido tardara un par de siglos en propagarse, la hibridación pudo haberse producido en fecha reciente: hace unos 4000 años.

Mucho antes de que se encontraran en el valle de Tehuacán, el maíz y el teosinte perenne tuvieron que divergir de un antecesor común. Acerca de este antecesor, casi nada se puede decir aparte de que perteneció probablemente a las Andropogoneeas, tribu de las gramíneas que incluye el sorgo, el mijo, la caña de azúcar y un buen número de importantes hierbas forrajeras y de pasto. Cómo evolucionó el maíz silvestre a partir de su antecesor remoto, y, en particular, cómo evolucionó la mazorca, todavía es objeto de especulación.

Nunca se ha encontrado maíz silvestre, y sospecho que nunca se encontrará. A más tardar, se habría convertido en una especie amenazada cuando los españoles introdujeron animales de pasto en el Nuevo Mundo, sobre todo la ágil y voraz cabra. Pero ya antes podría haber quedado asfixiado por el polen, arrastrado por el viento, de miles de hectáreas de maíz cultivado. A través de la fertilización cruzada, el maíz silvestre habría adquirido gradualmente las mazorcas sólidas, grandes, que le condenaron a la extinción.

No obstante, con el descubrimiento de *Z. diploperennis* se ha dado, por fin, con uno de los padres silvestres del maíz. Y con el reconocimiento de que el maíz cultivado moderno tiene dos padres, se puede cerrar el largo debate sobre su ascendencia. La pregunta "¿quién es el antecesor del maíz cultivado, el teosinte o el maíz silvestre?" no tiene ahora razón de ser: ambos lo son. Otros investigadores no estarán de acuerdo, pero, en mi opinión, el misterio del maíz está esencialmente resuelto.

Fragilidad de la pluviselva amazónica

Las zonas sometidas a las graves perturbaciones que acaban con los mecanismos de regeneración y los nutrientes tardarían un milenio en restablecerse. Los autores proponen aprovechar sus recursos acomodándose a la sucesión natural

Christopher Uhl y Juan Saldarriaga

La vegetación de una zona determinada depende del clima reinante en el lugar y del suelo sobre el que se asienta. La Amazonía, en pleno trópico, eclosiona en múltiples especies de todos los portes, arbóreas, arbustivas y herbáceas. Pero tiene su talón de Aquiles en el subsuelo. El ecosistema amazónico se considera frágil en razón de la extrema pobreza de su suelo, carente de suficiente reserva de nutrientes para permitir el restablecimiento del bosque después de la deforestación.

De acuerdo con las tendencias modernas en evolución vegetal, las plantas han avanzado de común acuerdo con los sistemas de polinización y dispersión de las semillas; dicho de otra manera, han evolucionado con los animales encargados de su propagación. Pues bien, la tala del bosque amazónico supone también un duro golpe contra la acción de mamíferos, aves e insectos portadores de polen y de semillas. Lo que se traduce en un obstáculo más contra la repoblación o la recuperación de una zona arrasada.

A lo largo de los últimos siete años, los autores han estudiado el efecto de las perturbaciones forestales típicas de la Amazonía en la reserva de nutrientes y en los mecanismos sucesores de la regeneración de la pluviselva. Las investigaciones se han realizado en los alrededores de San Carlos de Río Negro (latitud 1° 56′ N) en el territorio federal amazónico de la República de Venezuela. La topografía, los suelos y la vegetación poseen los mismos rasgos comunes en toda la región de San Carlos. La fisiografía del lugar corresponde a un sistema de colinas suaves, algunas de las cuales se elevan 50 metros sobre el nivel del río Negro. En esos montículos medran especies perennifolias (de hoja siempre verde) que miden de 25 a 30 metros de altura. Forman *bosques mixtos* de hasta un centenar de especies arbóreas distintas.

El suelo consta de un horizonte delgado de arena sobre otro más grueso de arcilla caolinítica con concreciones lateríticas. En los valles entre colinas hay, además, una capa gruesa de humus sobre lecho de arena gruesa. Estos suelos mantienen un bosque siempre verde, la *caatinga*, cuyo dosel se eleva 20 o 25 metros. La mayoría de los árboles presentes pertenecen a dos especies dominantes.

Tanto los suelos arcillosos como los arenosos son ácidos (con *p*H alrededor de 4) y pobres en los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas (nitratos, fosfatos, etcétera). Los suelos del norte de la Amazonía, donde se localiza San Carlos, suelen ser pobres por un doble motivo: la intensa meteorización por obra de la temperatura y de la pluviosidad y la dilatada falta de actividad geológica (como la elevación de montañas) que exponga el material parental rico en minerales esenciales para las plantas.

En respuesta a la escasez de nutrientes, los árboles han desarrollado distintos mecanismos que facilitan su captura y retención. Así, la ramificación epigea de raicillas finas, de 10 a 30 centímetros de espesor. Cuando una rama u hoja cae al suelo, la estera de raíces epigeas se adhiere al material caído y aprovecha los nutrientes liberados durante la descomposición. Las raíces trepan incluso por los árboles vecinos, debido quizás a que el agua que se escurre por los troncos es más rica en nutrientes que la embebida en el suelo. La alta precipitación de la zona de San Carlos (3500 milímetros anuales) y las condiciones de humedad en el suelo evitan la desecación de las raíces.

Las hojas de los árboles poseen también mecanismos de conservación de los nutrientes. Muchas especies poseen la hoja coriácea, con altos contenidos en polifenoles que las hacen resistentes al ataque de herbívoros y a la pérdida de elementos solubles. Los árboles producen hojas a lo largo de todo el año –es decir, no todas de golpe– de suerte que sea menos apremiante la demanda de nutrientes. Añádase a ello que los árboles del sotobosque suelen recubrirse con bastante frecuencia de epífitos (musgos, hepáticas, líquenes y algas), dotados de capacidad de obtener nutrientes del agua de lluvia y fijar nitrógeno atmosférico.

Se venía sosteniendo que el bosque amazónico había permanecido estable e inalterado durante los últimos 10.000 años. Sin embargo, recientes descubrimientos de grandes cantidades de carbón vegetal en un área de más de 5000 kilómetros cuadrados en el curso superior del río Negro ponen en entredicho semejante supuesto. Ello podría ayudar a explicar la enorme diversidad de especies del medio. La abundancia y la antigüedad del carbón hablan de varios incendios ocurridos en el pasado.

El carbón vegetal se encuentra en los suelos de bosque mixto de tierra firme inalterados. Algunas veces también en los suelos de bosques de caatinga e igapo. Las cantidades de carbón vegetal encontradas en el primer metro de suelo varían de cinco a 14 toneladas por hectárea; la distribución del mismo en el perfil es irregular, sin mostrar ninguna asociación con el color, horizonte y tipo de suelo. Las edades del carbón, determinadas por el método del carbono 14, iban de los 250 años hasta los 6260 para los suelos de oxisol y ultisol; se cifraba en torno a los 1400 años para los suelos de spodosol. Se descubrió carbón también en suelos antrozolíticos (suelos negros asociados con la acción del hombre y su desenvolvimiento: alto

1. FRAGILIDAD EN LA PLUVISELVA AMAZONICA y su distinta recuperación según el sistema de explotación que se lleve a cabo. La fotografía superior recoge, en el anillo interior, las posibilidades de restablecimiento de parcelas agrícolas recientemente abandonadas, rodeadas por bosque primario. La foto inferior nos muestra la otra cara de la moneda: la debilidad de un bosque arrancado con maquinaria pesada (bulldozers) tres años después.



2. SAN CARLOS DE RIO NEGRO, en cuyos alrededores se han realizado las investigaciones de los autores sobre la fragilidad de la pluviselva amazónica, se encuentra en el territorio federal de la República de Venezuela. La fisiografía del lugar corresponde a un sistema de colinas suaves, algunas de las cuales se elevan 50 metros sobre el nivel del río Negro. Medran allí especies perennifolias que forman bosques mixtos.

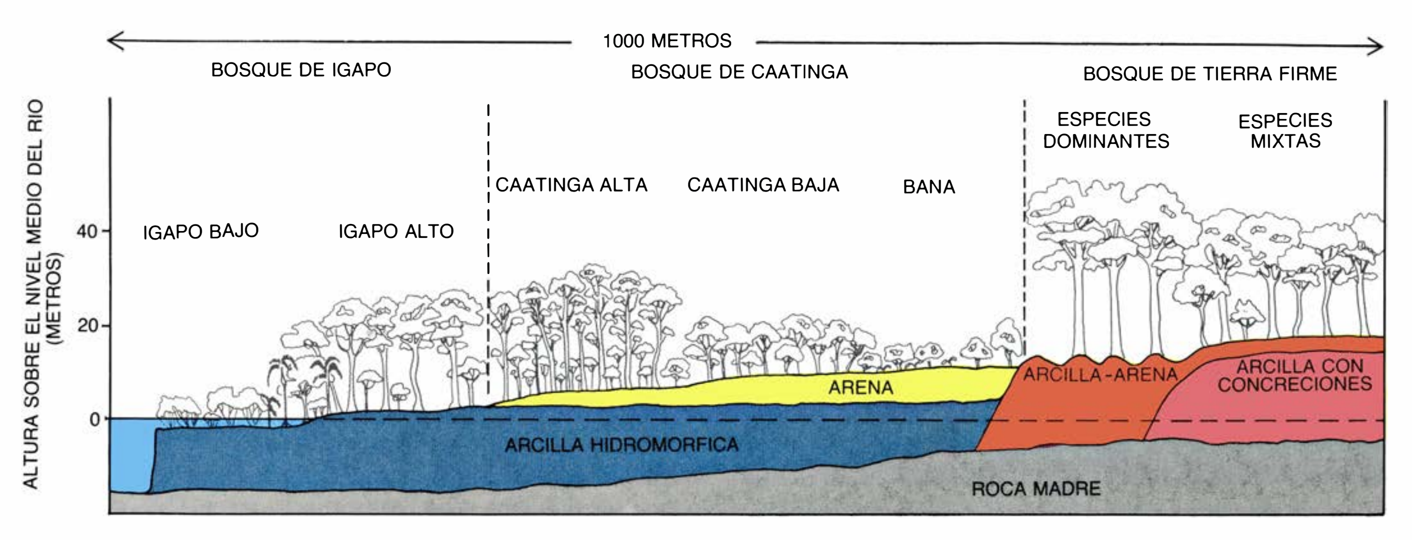
contenido en fósforo, huesos, restos de cerámica) en algunos puntos de San Carlos. Se han hallado, asimismo, varios restos de cerámica en dos bosques mixtos en suelos de ultisol; determinada su edad por el método de termoluminiscencia entre 460 y 3750 años, este último dato significaría que nos hallamos ante el fragmento cerámico más antiguo de la Amazonía.

¿Cómo explicar la presencia de carbón? Podría provenir de áreas destinadas a la agricultura tradicional de tala y quema que se viene desarrollando en la cuenca amazónica desde hace más de 4000 años; pero ni arqueólogos ni antropólogos creen que hubiera allí gran actividad humana, debido a la pobreza de los suelos y a la escasez de fauna. O bien ese carbón podría resultar de fluctuaciones climáticas de intervalos irregulares con una estación seca suficientemente larga que permitiera el secado de material combustible como hojarasca, ramas y troncos, que, expuesto, prendería fácilmente. Y cabría una tercera explicación: la combinación de estaciones secas y de actividad humana.

Sea como fuere, la prueba del carbón evidencia el papel destacado que el fuego ha desempeñado en la historia de las perturbaciones de la región de río Negro. Mas, por importante que haya sido, no se acerca ni de lejos a la acción perturbadora de distinta índole que está ocurriendo hoy. En orden de magnitud creciente, la pluviselva sufre las siguientes perturbaciones: caída natural de los árboles, tala del bosque, tala y quema, tala y quema con explotación agrícola temporal y desmonte con maquinaria pesada (bulldozers).

Para que pueda haber una recuperación después de cualquier perturbación, ha de contarse con reservas o potencial suficiente para recolonizar el área afectada, verbigracia, semillas, plántulas o tejidos que puedan retoñar. Cuatro son las vías a través de las cuales puede regenerarse la zona afectada. En primer lugar, las plántulas y los renuevos del estrato inferior del bosque que no han sufrido graves daños sirven de dique y preparan la recolonización boscosa ulterior. En los bosques de San Carlos hay unas 15 plántulas y pequeños renuevos (de menos de dos metros de altura) por cada metro cuadrado del estrato inferior. Esas plántulas y renuevos llegan a perdurar varios años en estado de desarrollo latente. (En el inventario de parcelas permanentes de un metro cuadrado de bosque mixto se ha observado una supervivencia de más del 80 por ciento de los individuos después de un año. Frecuentemente, las hojas observadas en una plántula fueron las mismas durante mediciones sucesivas.)

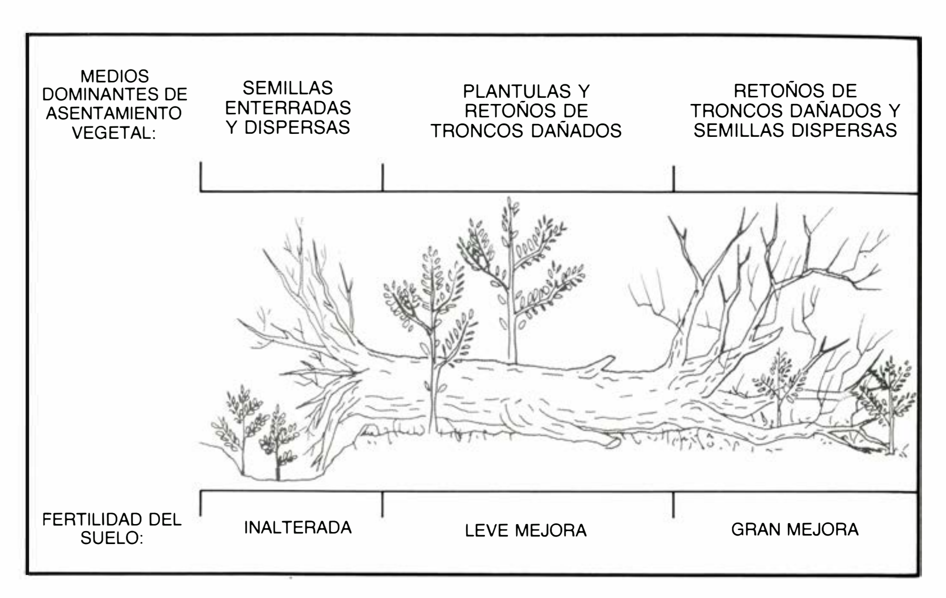
Un segundo mecanismo es el restablecimiento de la vegetación por medio de retoños. Entre las especies arbóreas del Amazonas es frecuente ver retoños en los troncos cortados o caídos, así como en las raíces. Las semillas enterradas en el suelo constituyen el tercer



3. TRANSECTO ALTIMETRICO cerca de San Carlos. Sobre el lecho rocoso se han depositado capas de arcilla hidromórfica, arcillas y concreciones lateríticas, arena y mezcla de arcilla y arena. Se ilustran, en una extensión arbitraria de un kilómetro, tres tipos distintos de bosque: Igapo, caatinga y tierra firme.

amazónico para su restitución. En los bosques del río Negro se contabilizan de 200 a 1000 semillas por metro cuadrado con potencial de germinación. Se trata, en su mayoría, de especies pioneras, caracterizadas por la llamada estrategia *r*: crecimiento rápido, facilitado por la mucha luz que les ha dejado la caída de la bóveda de la pluviselva. Esas semillas mantienen su capacidad incluso después de un año de enterramiento.

Vayamos con el cuarto mecanismo de restablecimiento de la vegetación. Nos referimos a la introducción de semillas de las áreas limítrofes a las perturbadas y las que caen dentro de estas últimas. Además, por supuesto, de la dispersión por el viento, aves, murciélagos o roedores. En este sentido, en San Carlos se halló que los excrementos de pájaros y murciélagos contenían cientos de semillas activas de las especies pioneras leñosas. (Las semillas de las especies propias de bosque maduro suelen ser mayores y de más difícil dispersión.)



4. DIAGRAMA DE UN ARBOL CAIDO en que se muestran diferentes microhábitats y modos de regeneración característicos. La caída de un árbol en los bosques de San Carlos deja claros en el dosel de unos 50 a 200 metros cuadrados, gracias a los cuales el suelo recibe luz solar varias horas al día. Se originan así tres microhábitats: el suelo mineral expuesto por las raíces de los árboles caídos, las zonas a ambos lados del tronco abatido y el área bajo la capa del árbol caído. La regeneración de la vegetación en el suelo mineral expuesto procede a través de semillas enterradas en el suelo o traídas por cualquier medio de dispersión; las plántulas preexistentes y los retoños de troncos dañados tienden a predominar a ambos lados bajo la copa del tronco. Las áreas son ocupadas principalmente por semillas o por rebrotes de los troncos dañados.

Los dos primeros mecanismos de regeneración –plántulas y retoños– posibilitan el asentamiento de la llamada vegetación primaria. Los dos últimos, semillas almacenadas en el suelo y la diáspora, posibilitan el crecimiento de la vegetación secundaria. Cuanto más daño se ocasione a cualquiera de estos cuatro mecanismos de regeneración, menores serán las posibilidades de restablecimiento del bosque.

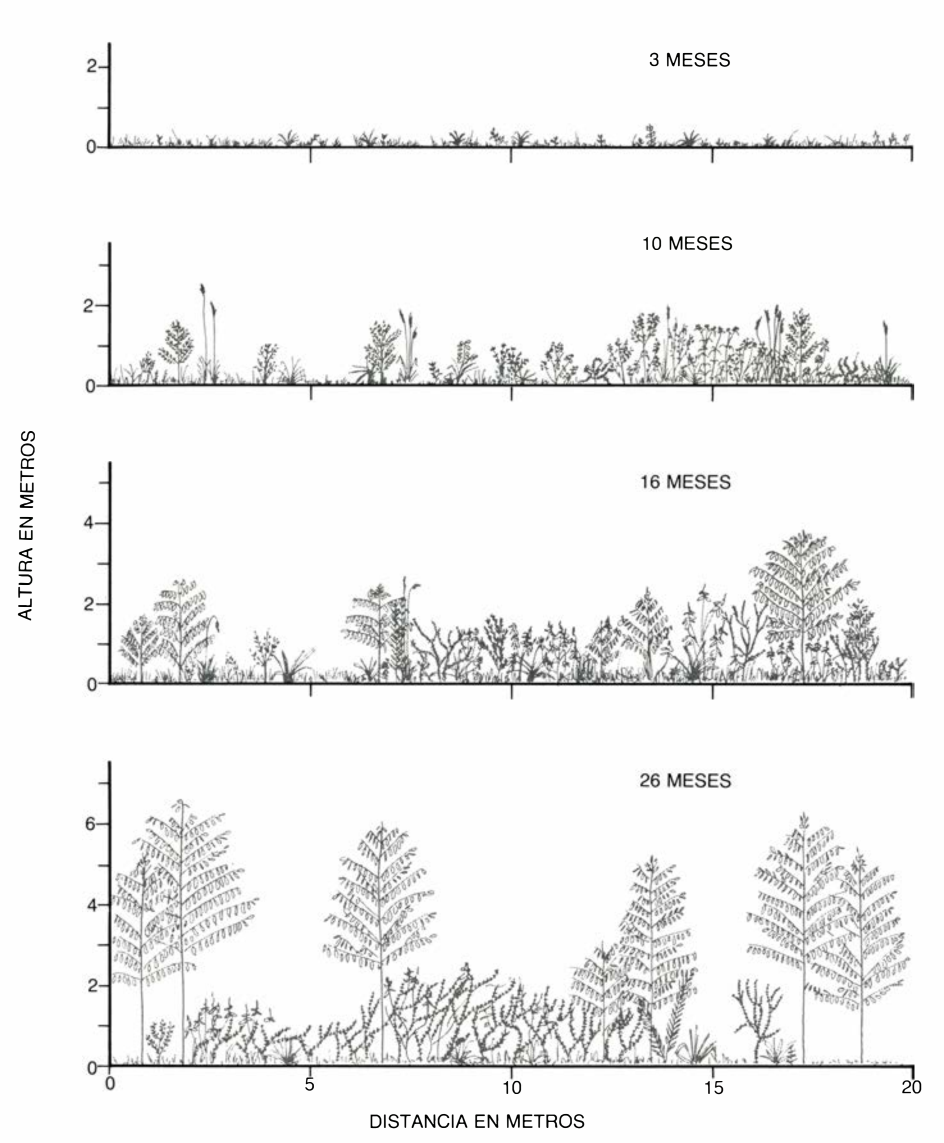
Hay que contar, además, con la existencia suficiente de nutrientes en el suelo para que pueda darse la regeneración vegetal. En los bosques de río Negro, la biomasa alcanza una cifra superior al 75 por ciento de las reservas totales de calcio, magnesio y potasio. Por tanto, la recuperación del bosque será más difícil después de producidas perturbaciones que reducen la cantidad almacenada de nutrientes en la biomasa vegetal y en el suelo. Y en eso estriba la fragilidad del ecosistema.

La recuperación del bosque se ha estudiado en tres situaciones: tras una perturbación de poca intensidad (caída de árboles), tras una perturbación de mediana intensidad (corta y quema de la biomasa vegetal para el aprovechamiento agrícola temporal) y luego de una perturbación de gran intensidad (desmonte con maquinaria pesada). ¿En qué forma afectan las perturbaciones a los cuatro mecanismos de regeneración y a las reservas de nutrientes en el suelo?

La caída de un árbol en los bosques de San Carlos deja, en el dosel, claros de unos 50 a 200 metros cuadrados. Gracias a esas aberturas, el suelo recibe luz solar varias horas diarias. Para averiguar con qué frecuencia caen los árboles, cartografiamos el estrato arbóreo de una hectárea de extensión, de bosque mixto, en 1975. Se volvió a repetir el trabajo de esa misma área en

	BOSQUE INALTERADO	BOSQUE TALADO	BOSQUE QUEMADO	CAMPO SEMBRADO Y FRECUENTEMENTE ESCARBADO	CAMPO ABANDONADO RECIENTEMENTE
EFECTO DE LA PERTURBACION SOBRE:					
MECANISMOS DE REGENERACION	INTACTOS	ALTA MORTALIDAD DE PLANTULAS	MORTALIDAD TOTAL DE PLANTULAS CAPACIDAD DE REBROTE REDUCIDA REDUCCION DE SEMILLAS VIABLES	GRAN REDUCCION DE LA CAPACIDAD DE REBROTE GRAN REDUCCION DE SEMILLAS VIABLES	PERDIDA CASI TOTAL DE TODOS LOS MECANISMOS INTERNOS DE REGENERACION
FERTILIDAD DEL SUELO	BAJA	SENSIBLE MEJORA	ALTA MEJORA	PERDIDA GRADUAL	BAJA

5. INCIDENCIA DE TRES PERTURBACIONES discontinuas en el tiempo: tala, quema y limpieza de maleza, en su asociación con la agricultura. Influyen de una manera variable en la regeneración del bosque y en la fecundidad del suelo. La tala comporta que la radiación solar incidente marchite muchas plantas del sotobosque, pero estimula la producción de retoños; la quema reduce el potencial de regeneración de los retoños; la escarda agota las reservas de retoños.



6. SUCESION VEGETAL en una zona a los tres, 10, 16 y 26 meses después de haber abandonado su destino agrícola. Se trata de un transecto permanente de 1 × 20 metros. Al principio, las herbáceas monopolizan la zona. Al cabo de un año, las especies leñosas inician su asentamiento y empiezan a sombrear las hierbas.

1980; vióse que, en ese quinquenio, habían caído 10 árboles cuyo diámetro superaba los 20 centímetros; se abatían, pues, con una media anual de dos por hectárea. Otros investigadores acaban de llegar a similares conclusiones en la Amazonía y Centroamérica.

Los mecanismos de regeneración permanecen intactos después de la caída, si bien el mecanismo predominante dependerá del claro abierto. En razón de éste se distinguen tres tipos de microhábitat: el suelo mineral expuesto por las raíces de los árboles caídos, la zona a ambos lados del tronco abatido y el área bajo la copa del árbol caído.

En colaboración con Nelda Dezzeo (Venezuela), se establecieron parcelas permanentes con varios de los árboles caídos al objeto de estudiar la evolución de esos microhábitats en un bosque mixto de San Carlos: la regeneración de la vegetación en suelo mineral expuesto, con las raíces arrancadas pues, procede por medio de semillas enterradas o llegadas a este lugar a través de cualquier forma de dispersión. Las plántulas preexistentes y los retoños de troncos dañados tienden a predominar a ambos lados del tronco caído, así como en las zonas dejadas en claro. Muchas plantas preexistentes del área donde cayó la copa mueren a causa de la abundante materia orgánica que cae sobre ellas de golpe, impidiéndoles el paso de la luz. Esa materia orgánica correspondiente a biomasa degradada del árbol caído estimula, a su vez, el crecimiento de las raíces. En algunos casos, éstas crecen tanto que cubren las plántulas, reduciendo aún más la disponibilidad de luz. Las áreas sombreadas, ahora expuestas, son ocupadas por semillas allí llegadas o por retoños de los troncos dañados. Todos los mecanismos de restablecimiento de la vegetación permanecen, pues, intactos, después de las perturbaciones naturales causadas por la caída de los árboles.

Se investigó también el efecto de la pérdida de nutrientes en el proceso de regeneración. Puesto que la mayoría de éstos se alojan en la vegetación y no en el suelo, la caída de un ejemplar grande –de un metro de diámetro– representa un aumento sustancial de nutrientes en un punto determinado del suelo. La materia orgánica del árbol caído se descompone lentamente. Algunos nutrientes liberados son aprovechados por la capa de raíces de la superficie; los restantes tornan al suelo. Para medir la pérdida de nutrientes por lixiviación en las zonas dejadas en claro, instalamos colectores por debajo de la capa de raíces: la pérdida de nutrientes resultó ser extremadamente pequeña, similar a los valores registrados en el bosque inalterado.

En los claros abiertos, la vegetación responde con rapidez al incremento de luz y nutrientes. Así, el incremento medio en el crecimiento de árboles pequeños en los bosques maduros de Río Negro (de menos de medio metro de altura) no llega a los dos centímetros anuales; ahora bien, esa cifra se convierte entre 30 centímetros y un metro para los árboles pequeños en las zonas clareadas. De acuerdo con las mediciones del crecimiento a corto plazo, las áreas de árboles caídos se tornan estructuralmente indiferenciables del bosque maduro a los 40 años. El bosque resiste, pues, esa alteración natural y obligada de su composición y todos los mecanismos de regeneración funcionan acordemente para facilitar la sucesión rápida sin pérdida de nutrientes.

De las alteraciones inducidas por el hombre en la Amazonía, la tala y quema del bosque seguida de agricultura temporal, es decir, de lapso corto de aprovechamiento para abandonar luego el terreno a su suerte, ha sido la pauta habitual. Y sigue siéndolo. Veamos el ejemplo de la práctica usual en San Carlos. Se comienza talando entre media y dos hectáreas de bosque mixto. Parte de los nutrientes acumulados en la vegetación se liberan en la quema y la otra se liberará lentamente a través de la descomposición de los troncos no quemados. En la superficie "limpiada" se plantó yuca o casava (*Manihot esculenta*); se plantaron también, sin ningún orden especial, piña, mapuey y plátanos. Un par de veces o tres al año se eliminaba la maleza para evitar el crecimiento de la vegetación secundaria. A los doce meses se podían arrancar las raíces de yuca para su con-

sumo. El proceso se repetirá por segunda o tercera vez antes de abandonar la parcela explotada.

Cada una de estas alteraciones separadas en el tiempo tiene efectos directos en los mecanismos de regeneración y, por tanto, en la capacidad del ecosistema para recuperarse. Cuando se produce la caída de un árbol, el aumento en la cantidad de luz influye en el crecimiento de los árboles del estrato inferior. En otro orden, la corta de una hectárea de bosque convertida en cultivo aumenta tanto la fracción de radiación solar que llega al suelo, que muchas plantas se marchitan y mueren ante esa elevación rápida de la temperatura. Sin embargo, la corta del bosque estimula la producción de retoños.

La quema del área después de la tala afecta también a los mecanismos de regeneración. Durante la quema medimos la temperatura utilizando pigmentos sensibles al calor sobre láminas de asbestos. La temperatura en la superficie del suelo varió entre 67 y 310 grados; a un centímetro de profundidad varió entre 48 y 199 grados C. Con respecto a los retoños, contamos su número en una zona que se había talado tres meses antes: registramos 6,4 retoños por metro cuadrado. Tres meses después de la quema quedaban 0,4 retoños por metro cuadrado. La quema reduce, pues, el potencial de regeneración de los retoños.

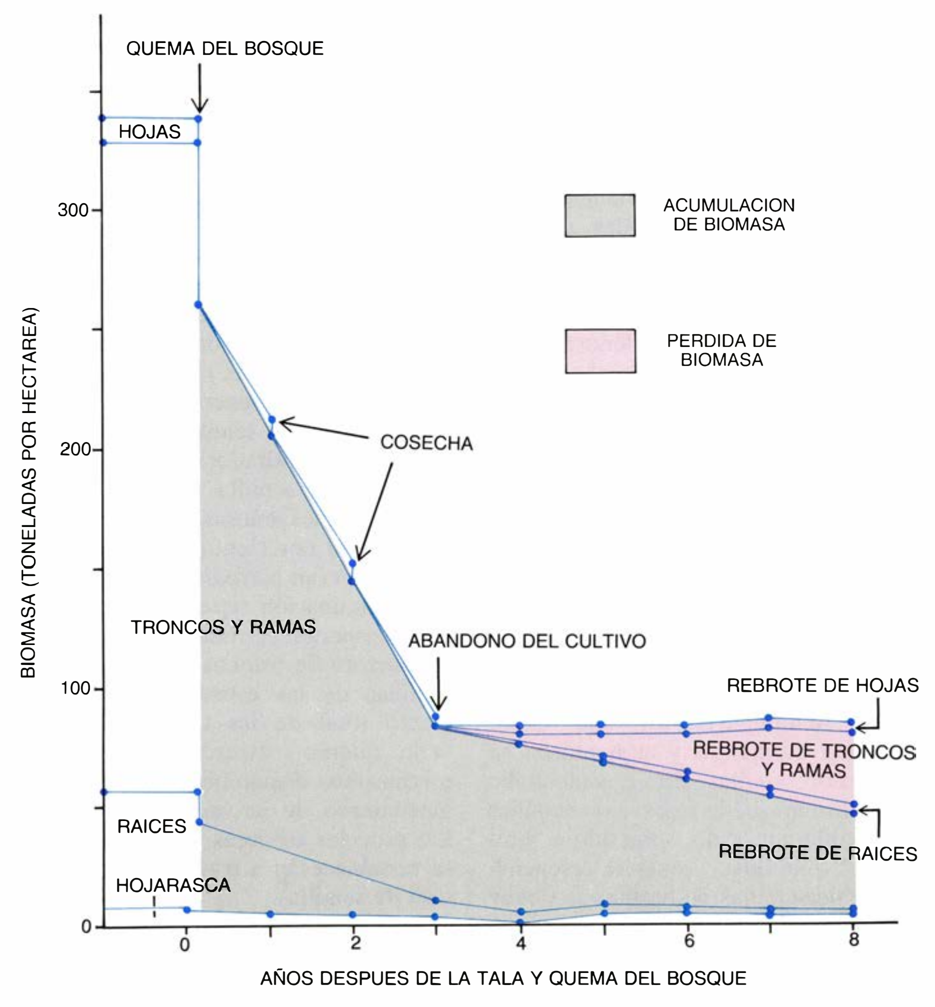
La temperatura alcanzada en la quema mata las semillas. Lo comprobamos tras recolectarlas de las 10 especies más comunes del lugar y someterlas luego a las temperaturas habituales de la quema. Debido a que las especies forestales suelen ser raras en el banco de semillas del bosque, todas las ensayadas eran pioneras. Las expusimos a 80 grados C de temperatura (normal a 1 centímetro de profundidad) y a 140 grados C (propia de la superficie) durante 5 minutos. Las colocamos luego entre dos papeles de filtro humedecidos, para facilitar la germinación. La germinación se redujo en más del 50 por ciento para todas las especies a la temperatura de 80 grados; ninguna germinó a 140 grados C.

Para verificar estos resultados en el campo, se recogieron (en compañía de Kathleen Clark, de la Universidad de Georgia) varias muestras de suelo de un bosque mixto sin alteración y otros de un lugar adyacente, talado y quemado para convertirlo en cultivo siembra. Ambos tipos se colocaron en un lugar soleado y se regaron diariamente. Se contaron todas las plántulas. Se halló que los bloques de suelo provenientes del sitio quemado tenían 158 semillas germinadas por metro cuadrado, mientras que las que provenían del bosque intacto tenían 752 semillas por metro cuadrado. Quedaba así patente que la quema reducía la reserva de semillas y, por tanto, disminuía la fuerza potencial que este mecanismo de regeneración desempeña en la recuperación.

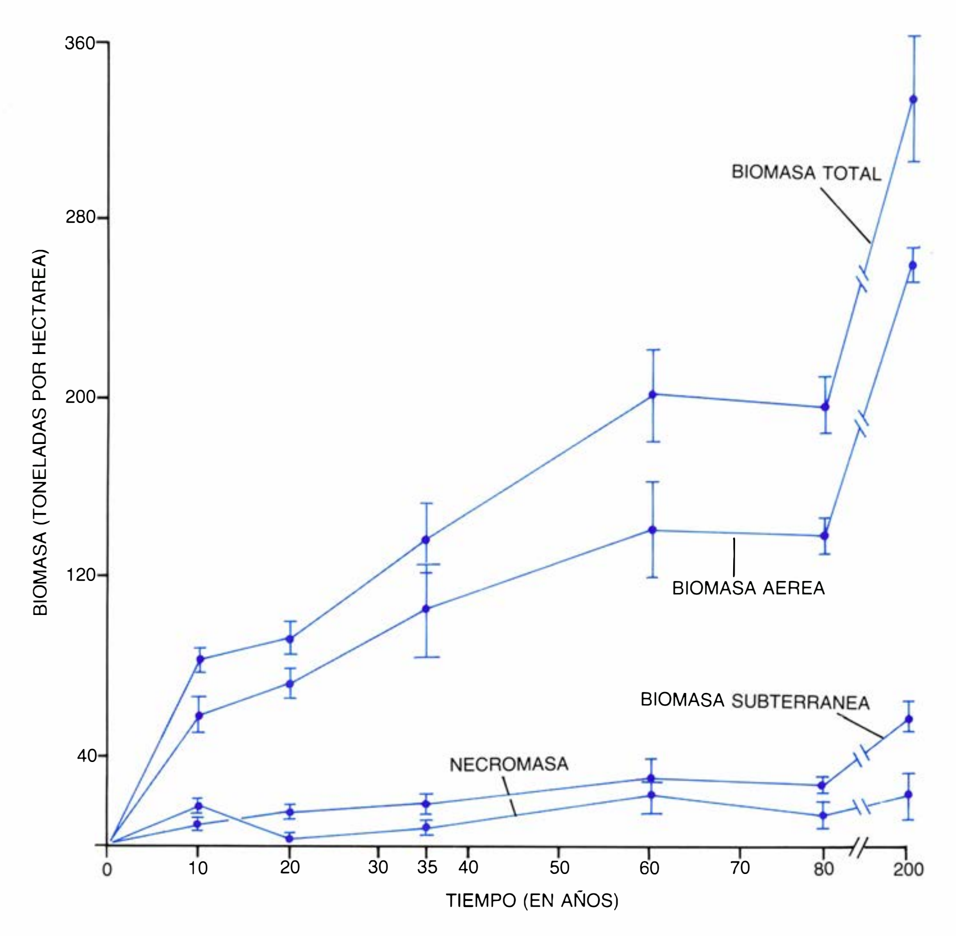
La dinámica vegetal viene a recorrer los pasos siguientes: en la zona quemada vemos árboles y plántulas muertos, troncos supervivientes retoñando aquí y allá; crecen luego árboles pioneros y hierbas procedentes de las pocas semillas que resistieron el aumento de temperatura. Se plantan desordenadamente, entre ramas y troncos, las especies que se desea cultivar. Durante los primeros meses, los cultivos y la vegetación silvestre compiten por los nutrientes liberados durante la quema. Cuando la vegetación silvestre empieza a dominar los agricultores se encargan de arrancarla. La sucesión secundaria, apenas despunta, es detenida con la "limpieza" de la vegetación silvestre.

Parecía razonable esperar que esa reiterada remoción de las especies espontáneas deteriorase aún más la regeneración por retoños y semillas, consolidando la fragilidad del lugar. Para examinar esta posibilidad se establecieron 27 parcelas permanentes de 1 metro de largo por uno y medio de ancho en una extensión cultivada cerca de San Carlos. Cada vez que el agricultor local iba a quitar la maleza recogíamos todos los renuevos presentes en las 27 parcelas y los separábamos en grupos: árboles del bosque, árboles pioneros y herbáceas. Se evidenció que la eliminación repetida de la vegetación espontánea provocaba cambios notables en la composición de los renuevos. En este sentido, la densidad de árboles del bosque en la primera limpieza era de 0,65 individuos por parcela (todos originados por retoños), pero en el quinto y último deshierbe la densidad se redujo a 0,11.

Por lo que se ve, la escarda frecuente agota las reservas de retoños de muchos árboles del bosque original. Las especies pioneras leñosas abundaron también en el primer deshierbe, correspondiéndoles el 64 por ciento del total de los tallos presentes, pero en la quinta limpieza sólo representaron el 2 por ciento. Por el contrario, la densi-



7. PERDIDA DE BIOMASA DEL BOSQUE preexistente durante la agricultura de tala y quema y acumulación de biomasa en la vegetación durante los primeros cinco años de recuperación del ecosistema.



8. LA BIOMASA TOTAL VIVA (aérea y subterránea) en superficies utilizadas en agricultura de tala y quema se acumula muy lentamente. Una parcela agrícola abandonada necesita de 140 a 200 años para alcanzar una biomasa comparable a la del bosque maduro no perturbado. Todo parece indicar que los bosques se restablecen después de la agricultura de tala y quema porque esas alteraciones son pequeñas y cuentan con fuentes de semillas cercanas, amén de nutrientes aportados por la descomposición de troncos y frutales.

dad de hierbas fue relativamente baja en las dos primeras escardas, pero en las últimas más del 95 por ciento de los renuevos presentes fueron hierbas.

La explicación más lógica de la disminución de las especies leñosas sucesivas y el incremento de las herbáceas tras escardas repetidas nos parece ser la siguiente: en un principio, las especies leñosas sucesivas germinaron de la escasa reserva de semillas que sobrevivieron a la quema, pero luego se eliminaron antes de llegar a la fructificación que permitiera su persistencia en el lugar. Las herbáceas, por contra, germinaron, florecieron y produjeron semillas en pocos meses, esto es, en un tiempo menor que el intervalo de escarda. Acumularon, así, una mayor densidad de plantas y aumentaron su reserva de semillas. Ello nos facultaba para afirmar que la reserva de semillas de un sitio cultivado, sometido a "limpiezas" repetidas, constará esencialmente de semillas de herbáceas y muy pocas de especies leñosas.

Quisimos comprobar la hipótesis y regresamos a la parcela de cultivo donde se habían tomado muestras inmediatamente después de la quema. Había que recoger más testigos para realizar experimentos de germinación con el banco de semillas. (Recuérdese que había 155 semillas por metro cuadrado inmediatamente después de la quema y que casi todas eran de especies leñosas pioneras.) Tras dos años de uso agrícola, nos encontramos con un millar largo de semillas germinables por metro cuadrado; la composición del banco de semillas había cambiado de las especies leñosas a las herbáceas: más del 90 por ciento de las especies presentes eran hierbas.

La eliminación repetida de la vegetación espontánea reducía la capacidad productora de retoños y el número de semillas de las especies leñosas. El efecto total de las tres operaciones –tala, quema y escarda– desactiva los mecanismos disponibles para el restablecimiento de la vegetación leñosa. Las especies arbóreas y arbustivas sólo se restablecerán a través de la dispersión de semillas.

Además de la eliminación de los mecanismos de regeneración, nos preocupaba la pérdida de nutrientes durante la agricultura de tala y quema, que puede impedir la regeneración y, por ende, contribuir aún más a la fragilidad del lugar. Para averiguarlo debíamos calcular la cantidad de nutrientes presentes en la materia orgánica y en el suelo del bosque antes y después del cultivo. En colaboración con Carl Jordan, de la Universidad de Georgia, uno de los autores (Uhl) encontró, en San Carlos, que las reservas de nutrientes en el suelo después de tres años de agricultura eran similares o algo mayores (según el elemento) que las reservas del bosque original, mientras que las reservas totales de materia orgánica (es decir, la materia orgánica en el suelo más la vegetación viva o muerta) bajaron de más de 400 toneladas por hectárea a menos de 200 toneladas por hectárea. Los nutrientes de las 200 toneladas de materia orgánica que desaparecieron del lugar se sacaron con la cosecha o se perdieron por lixiviación o volatilización.

La pérdida de nutrientes debida a la cosecha correspondía sólo a una pequeña fracción de la pérdida total de nutrientes (no llegaba ni al 10 por ciento para cada elemento). Las pérdidas por lixiviación fueron cuantiosas en algunos casos. En uno de sus experimentos, Jordan colocó colectores debajo de la zona de raíces; los instaló un año antes de que comenzaran los cultivos. Desde ese momento, hasta que la parcela se abandonó definitivamente, cada semana se bombeaba a la superficie el agua de los colectores y se analizaba para determinar la concentración de nutrientes. Combinando estos datos con medidas de precipitación pluvial y evapotranspiración Jordan comprobó que se habían lixiviado considerables cantidades de ciertos nutrientes. Se perdió el 70 por ciento de la reserva original de potasio, por ejemplo. El suelo aparece así como un compartimiento dinámico por donde transitan la mayoría de los nutrientes que proceden de la descomposición de la madera y de la estera de raíces; los cultivos sólo utilizan una pequeña proporción de los mismos.

Se ha visto que la agricultura de tala y quema destruye todos los mecanismos de regeneración y produce una considerable pérdida de ciertos nutrientes. Pero, ¿qué pasa en estos lugares después del abandono? Para responder a esta cuestión hemos seguido de cerca la sucesión en parcelas permanentes ubicadas en parcelas agrícolas abandonadas de San Carlos. Se ha comprobado que, en un comienzo, las herbáceas monopolizan la zona, lo que se entiende si recordamos que la reserva de semillas herbáceas constituye

el único medio de regeneración actual. Al cabo de un año, las especies leñosas pioneras inician su establecimiento y empiezan a sombrear las hierbas. Estas plantas leñosas se originan probablemente de las semillas de las especies que bordean el claro. Los márgenes de una parcela agrícola no suelen cultivarse y, quemados a medias, posibilitan la invasión de una vegetación pionera leñosa.

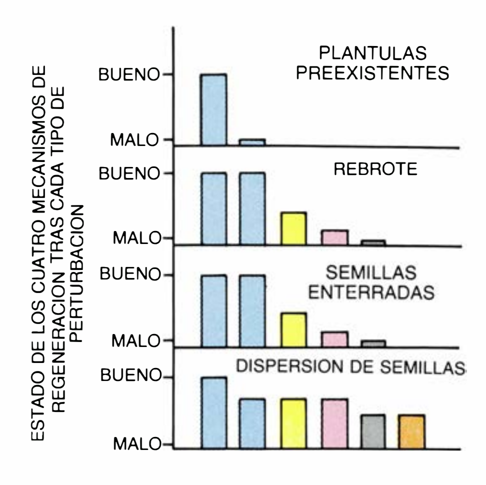
Del mismo modo que los claros producidos por la caída de los árboles presentan distintos microhábitats (cada uno con su propia microsucesión), los lugares de cultivo abandonados contienen también microhábitats diferentes que determinan el establecimiento de las especies leñosas. Cuando el campo antaño cultivado se deja a su suerte, gran parte del mismo es suelo raso con grandes troncos, parcialmente descompuestos, y algunos árboles frutales aislados que coexisten con grupos de piñas o yucas. Para examinar las diferencias entre esos microhábitats (suelo raso, suelos cubiertos con troncos y ramas, suelos sombreados por árboles frutales y suelos sombreados por cultivos de piña o yuca) en la dinámica de la vegetación, acometimos ciertos experimentos en cada tipo de microhábitat. Se realizaron en un campo de abandono reciente, parcelado en áreas de 3 metros de lado. Al cabo de un año se contaron e identificaron todas las plantas herbáceas y leñosas desarrolladas en cada parcela: las áreas con árboles frutales y con troncos y ramas tenían muchas más plantas leñosas que el suelo raso.

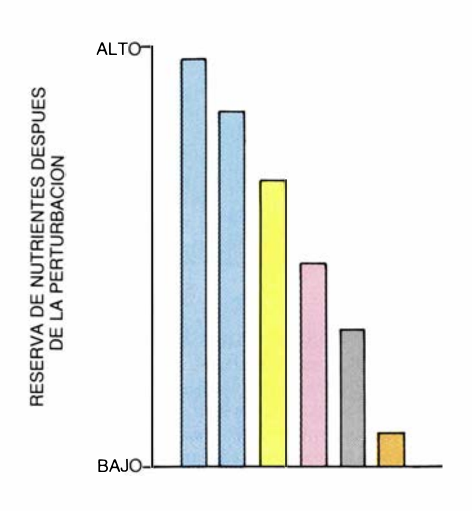
Ese distinto asentamiento de las plantas leñosas podía deberse a la dispersión diferencial de las semillas. Al final del estudio, descubrimos que los suelos de los frutales de merey tenían 932 semillas germinables de especies leñosas por metro cuadrado, mientras que cerca de los troncos había 126 semillas por metro cuadrado y en el suelo raso 74. El aumento de la reserva de semillas bajo los árboles frutales cultivados podría ser propiciado por los murciélagos y pájaros, atraídos hacia estos microhábitats, donde depositarían sus excrementos con semillas. La germinación diferencial de las semillas, o la mortalidad diferencial de las plántulas, pueden constituir elementos importantes para explicar el mayor establecimiento de plantas en los microhábitats de árboles frutales y en los de troncos y ramas. La presencia de restos de troncos y cenizas reduce la evaporación y la temperatura en la superficie del suelo, creando unas condiciones de humedad y temperatura favorables para la germinación de nuevas plántulas. Además, la descomposición de los restos de troncos y cenizas liberan nutrientes. Los árboles frutales protegen a las plantas de la insolación directa y aseguran el suministro de nutrientes a través de la descomposición de las hojas caídas.

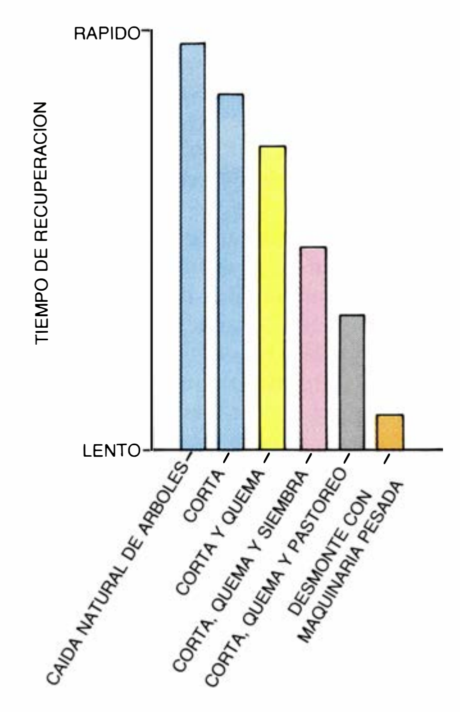
Cuando se abandonan las parcelas de cultivo apenas hay árboles frutales (25-50 individuos por hectárea), y la mayoría de los restos de troncos se han descompuesto. Las especies leñosas se establecen en estas zonas protegidas bajo los árboles frutales y troncos caídos, formando islas de vegetación que siguen expandiéndose hasta acoplarse.

Para tener una visión más clara de los cambios ocurridos en la dinámica de la sucesión del bosque en áreas perturbadas por agricultura de tala y quema se realizó un estudio en 19 parcelas agrícolas abandonadas entre 9 y 80 años, y otras de bosque maduro. En cada lugar seleccionado se cuantificó la biomasa de árboles con diámetros mayores de 1 centímetro y alturas superiores a dos metros. Para estimar la biomasa aérea viva se talaron 126 árboles con diámetros entre 1 y 123 centímetros. Hojas, ramas y troncos de los árboles cortados se fragmentaron, secaron y pesaron. Mediante ecuaciones de regresión se calculó la biomasa aérea viva (peso seco) por componente y el total en cada lugar. Hallamos que la biomasa aumentaba linealmente pasando, de 15 toneladas por hectárea a los dos años, a 150 toneladas por hectárea a los 60 años. En los lugares abandonados hacía 60 u 80 años, la biomasa aérea presentaba poca variación, con valores en torno a las 150 toneladas por hectárea. Ese escaso aumento de biomasa debíase, quizás, a que casi un tercio de los árboles dominantes que ocupan el dosel superior comienzan a morir cumplido ya su ciclo vital. La biomasa aérea viva acumulada en las parcelas agrícolas de 80 años era sólo un 59 por ciento de la biomasa de un bosque maduro sin perturbar, cuya biomasa se cifra en 255 toneladas.

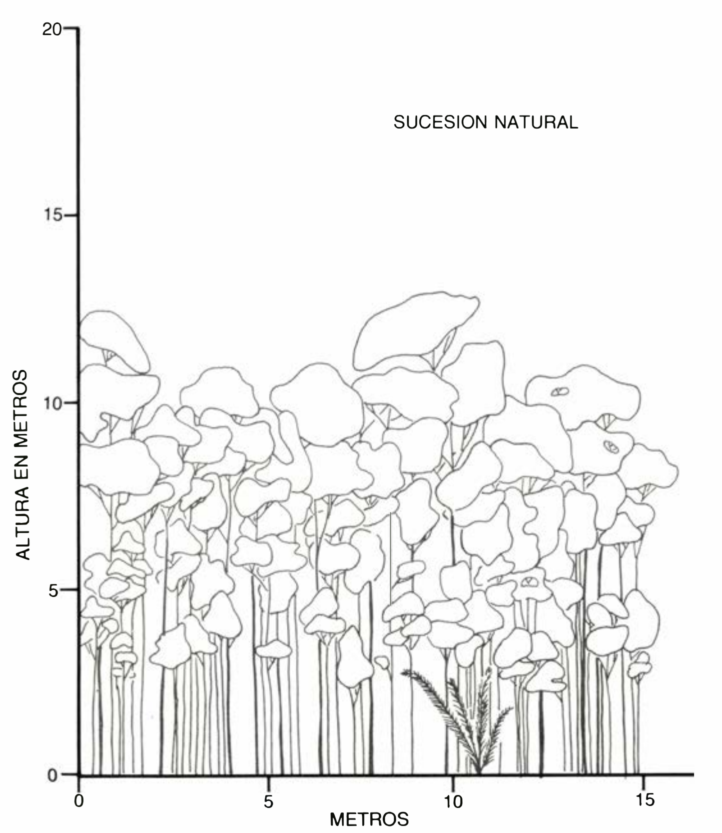
La biomasa subterránea se estimó a través de la cosecha de raíces en 24 calicatas de 50 × 50 × 100 centímetros. El muestreo se realizó en seis de los 23 lugares que mejor representaban las diferentes edades de las parcelas. La biomasa subterránea correspondiente a los otros 17 lugares se calculó mediante ecuaciones de regresión basadas en los datos de las seis zonas muestreadas. Variaba entre 10 y 32 toneladas por hectárea en parcelas de 10 y 80 años, respectivamente.

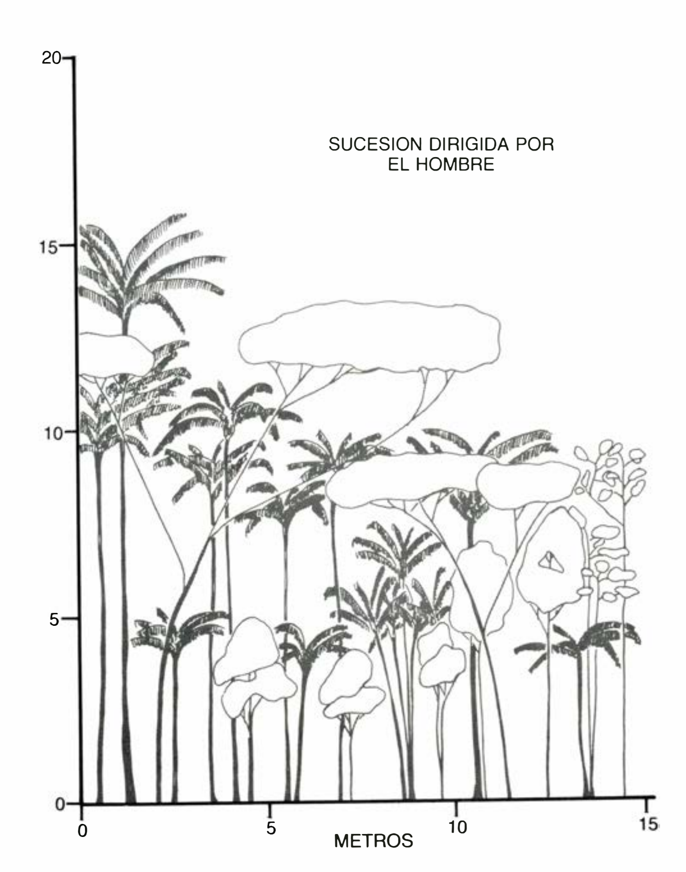


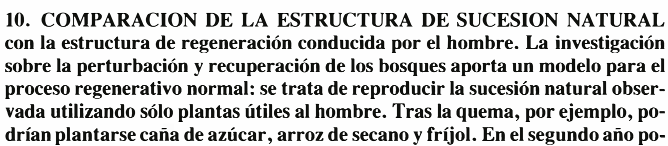




9. PERTURBACIONES a que se encuentra sometida la pluviselva amazónica y mecanismos de recuperación, tiempo de la misma y reserva de nutrientes después de cada perturbación. Los dos primeros mecanismos de regeneración –plántulas y retoños– posibilitan el asentamiento de la vegetación primaria. Los dos últimos, semillas almacenadas en el suelo y la diáspora, posibilitan el crecimiento de la vegetación secundaria. (Esquemas de los autores.)







10. COMPARACION DE LA ESTRUCTURA DE SUCESION NATURAL con la estructura de regeneración conducida por el hombre. La investigación sobre la perturbación y recuperación de los bosques aporta un modelo para el proceso regenerativo normal: se trata de reproducir la sucesión natural observada utilizando sólo plantas útiles al hombre. Tras la quema, por ejemplo, podrían plantarse caña de azúcar, arroz de secano y fríjol. En el segundo año podría introducirse cultivos análogos a las especies de árboles pioneros: yuca, papaya y plátano. Simultáneamente podría plantarse árboles de más larga vida, similares a las especies de árboles del bosque primario: pijiguao, nuez del Brasil y palo rosa. La zona comenzaría a ser reproblada y transformada en bosque, pero con la diferencia de que todas las plantas poseen interés económico, ya sea por su valor nutritivo, sus propiedades medicinales, su resina o madera.

La biomasa aérea muerta está formada por la biomasa de árboles muertos en pie y caídos en el suelo. La calculamos recogiendo todos los árboles mayores de cinco centímetros de diámetro en tres parcelas de 152 metros cuadrados cada una; la biomasa de árboles mayores de 10 centímetros muertos, aunque en pie, se determinó mediante una ecuación de regresión para los individuos de parcelas de 50 × 50 metros, abandonadas hacía 30 años o más. Diez años después del abandono de la parcela agrícola todavía se registraban valores de 18 toneladas por hectárea en peso seco. Casi toda esta biomasa corresponde a los árboles del bosque anterior a la perturbación. La biomasa muerta prosigue en su proceso de descomposición hasta alcanzar los valores más bajos a los 20 años, aproximadamente una tonelada por hectárea. La biomasa muerta comienza luego a incrementarse alcanzando 23 toneladas por hectárea a los 60 años: este valor alto se explica en parte por la mortalidad de los árboles dominantes.

Como conclusión general puede decirse que, en la región del curso alto del río Negro, la biomasa total viva (aérea y subterránea) en superficies utilizadas en agricultura de tala y quema se acumula muy lentamente. Una parcela agrícola recién abandonada necesita de 140 a 200 años para alcanzar una biomasa comparable a la del bosque maduro no perturbado. Todo parece indicar que los bosques se restablecen después de la agricultura de tala y quema porque esas alteraciones son pequeñas y cuentan con fuentes de semillas cercanas y nutrientes aportados por la descomposición de troncos y árboles frutales.

Pero, ¿qué tipo de regeneración del bosque se producirá cuando las perturbaciones sean intensas y a gran escala? Pensemos en el desmonte para obras públicas o para pastos de ganadería. Algunos datos se recogieron en 1971, cuando, al sur de San Carlos, se desmontaron unas 10 hectáreas con maquinaria pesada (bulldozer) para construir un asentamiento militar. El proyecto, abandonado dos años más tarde, permitió abordar el proceso de recuperación de un lugar que habíase alterado profundamente.

Los bulldozers arrancaron todas las plántulas, troncos y raíces de los árboles que podían haber retoñado, así como las reservas de semillas del suelo. Al removerse la capa superficial y los restos de troncos y ramas, se eliminaron casi todos los nutrientes disponibles. En breve: se atentó contra todos los mecanismos de restablecimiento de la vegetación en aquel lugar.

Diez años después del arrasamiento el área afectada no ha avanzado: sigue igual que cuando la perturbación. Las únicas plantas presentes son algunas hierbas y pequeños arbustos. La biomasa vegetal aérea no llega a las dos toneladas por hectárea. (La biomasa acumulada de un bosque maduro sin perturbar se halla en torno a las 300 toneladas por hectárea.) A la presente tasa de acumulación, la biomasa aérea del lugar necesitará más de 1000 años antes de alcanzar los valores del bosque maduro. El restablecimiento de los árboles dependerá de las semillas de bosques vecinos. Ante la posibilidad de que la dispersión sea a través de animales, varios investigadores han objetado que murciélagos, pájaros y roedores del bosque –vehículos potenciales– no se acercan a grandes áreas desprovistas de vegetación. Añádase que, en el caso de que las semillas de los árboles del bosque llegaran a la zona perturbada, resultaría problemático su restablecimiento, dadas las condiciones severas microclimáticas y la escasez de nutrientes en el suelo.

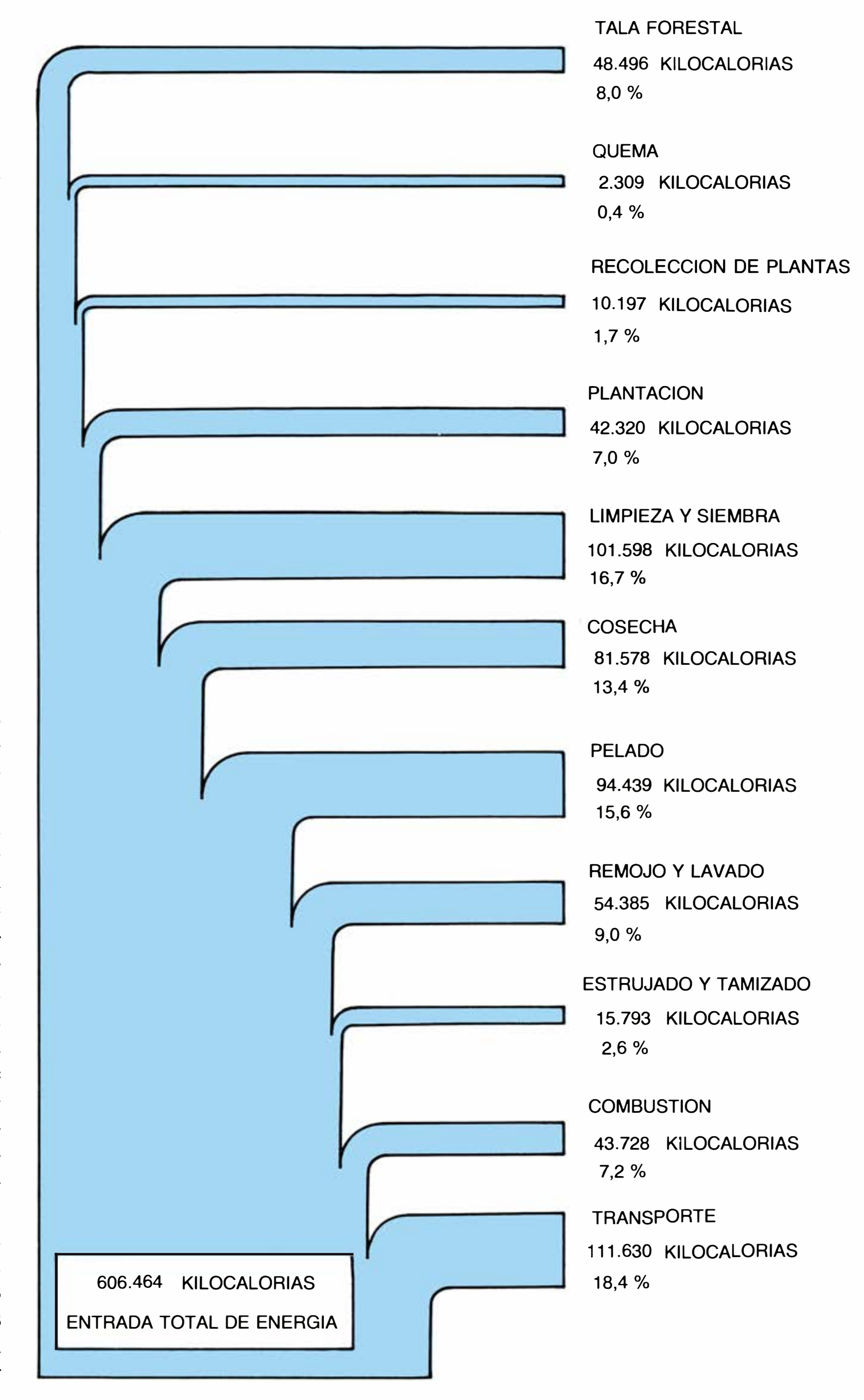
Apoyados en estos estudios de sucesión en San Carlos, podemos afirmar

que, tras las perturbaciones profundas de Río Negro, se requerirán períodos de tiempo dilatadísimos hasta lograr la recuperación del bosque una vez eliminados los mecanismos de regeneración y los nutrientes. En esto estriba la fragilidad del ecosistema.

De esta investigación sobre la perturbación y la recuperación de los bosques cabe extraer algunas conclusiones de valor práctico. Por ejemplo, la transformación de una parcela agrícola abandonada en un bosque sirve de modelo para el diseño de agroecosistemas de producción sostenida. Se trata de reproducir la sucesión natural observada utilizando sólo plantas útiles al hombre, pues en el primer estadio de la sucesión natural crecen pastos y hierbas. Tras la quema podrían plantarse caña de azúcar, arroz de secano y fríjol. En el segundo año podrían introducirse cultivos análogos a las especies de árboles pioneros: yuca, papaya y plátano. Simultáneamente podrían plantarse árboles de más larga vida, similares a las especies de árboles del bosque primario: pijiguao, nuez del Brasil y palo rosa. La zona comenzaría a ser repoblada y transformada en bosque, pero con la diferencia de que todas las plantas poseen interés económico, ya sea por su valor nutritivo, sus fibras, sus propiedades medicinales, su resina o madera. Cuando las plantas envejezcan o pierdan su capacidad productora, el bosque puede talarse.

En la región de Río Negro, los agricultores plantan la mayoría de sus parcelas de cultivo con yuca. No obstante, en las huertas familiares que rodean las viviendas plantan primero caña de azúcar, piña y plátanos, amén de yuca. Poco después introducen mayor variedad de árboles frutales de vida más larga. Cuando la producción de yuca se acaba, el campo de cultivo presenta una rica mezcla de pequeños árboles frutales de vida más larga. Al comparar esta sucesión dirigida por el hombre con la sucesión natural en una parcela de cultivo abandonada siete años atrás, comprobamos una semejanza notable en la estructura de ambos. Así, el dosel tenía 14 metros de altura en la zona domesticada y 12 metros en el área de sucesión natural. Algo similar ocurrió con el área basal (una medida del área de la sección transversal de los troncos a 1,5 metros de altura): se encontraron 14,3 metros cuadrados por hectárea en la parcela cultivada y 12,3 metros cuadrados por hectárea en el lugar de sucesión natural. Estos resultados indican que la altura de los árboles en las sucesiones inducidas podrían alcanzar la misma altura y adquirir la misma biomasa de bosque, a la misma velocidad, o mayor, que la sucesión natural.

Esta práctica humana que imita la sucesión en el agroecosistema conviene hacerla compatible con los sistemas indígenas mediante el desarrollo de combinaciones de plantas útiles que se complementen entre sí en sus hábitos de radicación, necesidades de luz, requerimientos de polinización, estacionalidad en la producción de sus cosechas, etcétera. Con ello se mantienen agroperturbaciones pequeñas y se explotan las reservas de nutrientes del ecosistema con la máxima eficacia. El agricultor no tendría que moverse de su entorno cada 2 o 3 años, pues esta forma modificada de agricultura de tala y quema facilitaría la explotación de la parcela durante un período más largo. Y se permitiría que el ecosistema permaneciera en su estado natural.



11. CONTRIBUCION DE ENERGIA humana en la producción y la cosecha de yuca en una hectárea cultivada por un período de dos años. Por este trabajo, el agricultor recibe 8.400.000 kilocalorías en comida por hectárea: el campesino recibe 14 kilocalorías en comida por cada kilocaloría invertida en trabajo.

Nichos térmicos de la lubina listada

Según parece, la temperatura del agua preferida por el pez cambia con la edad. El hacinamiento en las zonas óptimas pudiera ser la razón de que determinadas poblaciones de esa lubina no prosperen

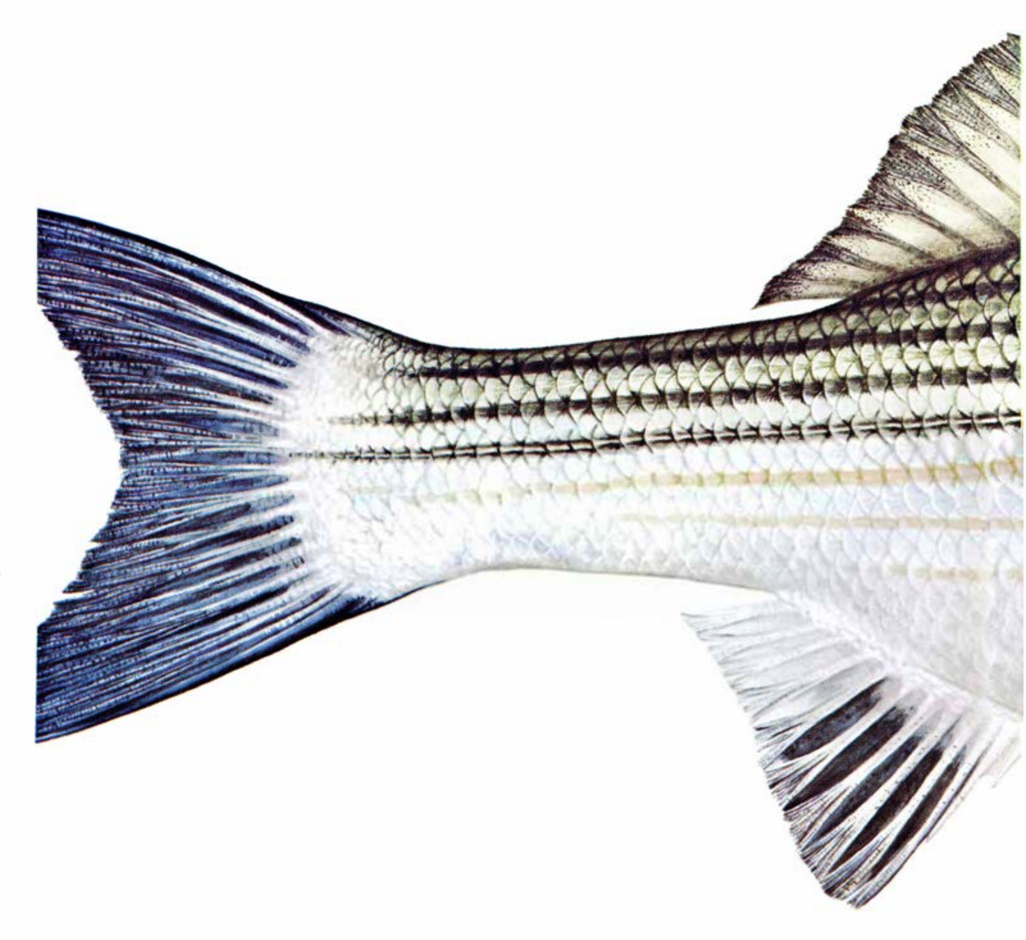
Charles C. Coutant

La lubina listada (*Morone saxatilis*), apreciada tanto por los pescadores comerciales como por los deportivos, es, por naturaleza, un pez costero que migra río arriba para frezar. Hace unos 30 años se descubrió que esa lubina americana puede medrar en agua dulce, y desde entonces se la confina en muchos ríos y embalses del continente.

La lubina listada es hoy motivo de preocupación: se están reduciendo las poblaciones costeras e incluso en algunas de las poblaciones dulceacuícolas, en su mayoría prósperas, se advierten una excesiva mortandad estival entre los adultos de mayor talla y el fracaso de algunos peces confinados en alcanzar el tamaño esperado. Al examinar estos problemas en el contexto de las investigaciones ecológicas que realizo en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, he encontrado que la temperatura del agua preferida por la lubina listada varía con la edad del pez. En cada uno de los principales estadios de su vida, una misma lubina listada ocupa distintos nichos térmicos. Es probable que, en ocasiones, algunos de esos nichos térmicos se encuentren superpoblados, ya sea por un exceso de peces o porque el volumen de agua de la temperatura adecuada resulte insuficiente para sustentar a la población. Puede que de aplicarse esta información a la gestión de las poblaciones costeras y de agua dulce se redujeran los problemas que afectan a la lubina listada.

Tal estrategia sustituiría a la tendencia que supone buscar causas locales de adversidad, como son la contaminación tóxica, barreras a la freza, la depredación y la sobrepesca. Punto de especial controversia, y por ello estímulo para buena parte de la investigación sobre la lubina listada, han sido los sistemas de refrigeración de las centrales de energía, que descargan agua caliente en lugares frecuentados por la lubina listada, por ejemplo el río Hudson.

Dado que poseemos ahora más información sobre la especie, la atención se centra en las características comunes que se advierten en las poblaciones norteamericanas de lubina listada. En la actualidad, la ecología de la lubina listada puede interpretarse a modo de un mosaico de hábitats y de recursos, que se reparten los distintos grupos de edad. La base de tal interpretación es que, según puede demos-



1. LUBINA LISTADA AMERICANA (*Morone saxatilis*); es un pez anádromo, lo que quiere decir, que vive en aguas costeras y migra río arriba para frezar. En la década de 1950 se descubrió que estas lubinas, muy

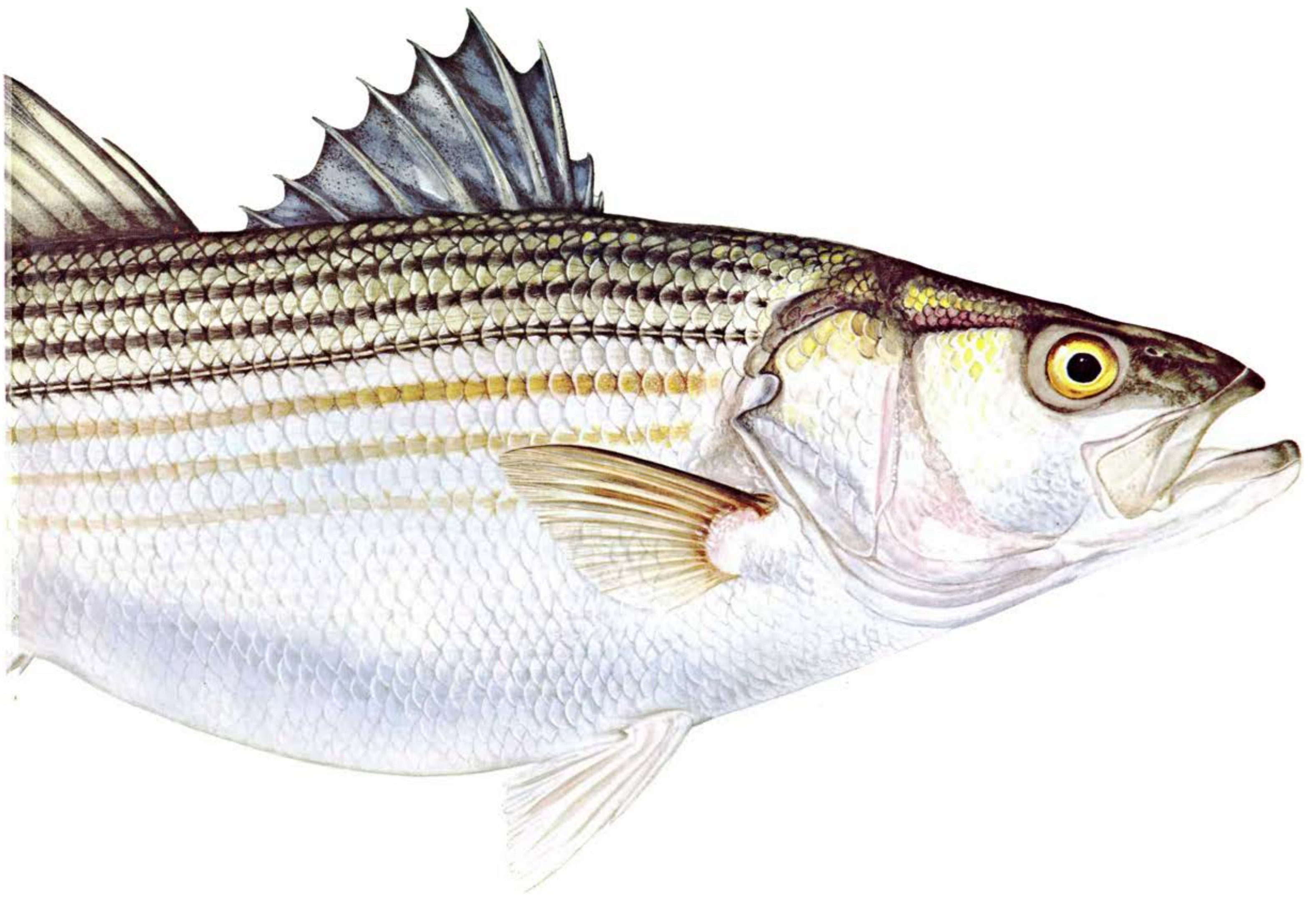
trarse, los requerimientos ambientales difieren entre adultos y juveniles. En particular, la necesidad que los adultos tienen de agua fría parece explicar muchas características, por otro lado paradójicas, del éxito y del fracaso de las poblaciones de esta lubina.

Los machos de lubina listada suelen madurar a la edad de dos años, cuando alcanzan de 30 a 35 centímetros de longitud y pesan de 0,3 a 0,6 kilogramos. Las hembras frezan típicamente por primera vez a los cuatro o cinco años; por entonces miden de 45 a 55 centímetros y pesan de 1,5 a dos kilogramos. La freza tiene lugar en primavera; a lo largo de su vida, que suele ser de 10 años, cada pez freza varias veces, pero no necesariamente cada año. Una hembra en freza libera alrededor de un millón de huevos semiflotantes. A los tres o cuatro días, según la temperatura del agua, los huevos eclosionan en forma de larvas semitransparentes que derivan con la corriente. Un mes más tarde, las larvas que sobreviven a los rigores de la vida planctónica se transforman en juveniles, que nadan libremente y se agrupan en zonas someras del litoral. Por lo general permanecen en la desembocadura salobre del río y en los estuarios costeros hasta contar dos o tres años de edad.

Después, y desde cabo Hatteras hasta Nueva Inglaterra, un elevado número de adultos (pero no todos) abandona los estuarios de su nacimiento y migra en cardúmenes a lo largo de la costa, viajando normalmente hacia el norte en verano y hacia el sur en invierno. Al sur del cabo Hatteras, en el golfo de México, en el río San Lorenzo y en la costa Oeste, las lubinas listadas raramente realizan migraciones costeras: permanecen estrechamente asociadas a los ríos de marea. Las lubinas listadas de los embalses de agua dulce muestran también movimientos estacionales. Los adultos pasan el invierno en la parte profunda de una bahía, lejos de las corrientes.

A pesar de su brevedad, esta sinopsis recoge las principales diferencias de los hábitats que ocupa la lubina listada a distintas edades. Evidentemente, los cambios de hábitat no constituyen respuestas simples a las condiciones locales, sino que reflejan adaptaciones genéticas de la especie, propias de cada edad.

Una hipótesis útil en la orientación de la investigación ha sido que la pauta del ciclo biológico se desarrolló, por selección natural, en estuarios nativos de la costa Este y determinó los requerimientos ambientales de la especie. Tales requerimientos habrían de manifestarse en cualquier ambiente donde quedaran alojadas las lubinas listadas, aunque la selección natural ulterior puede haber diversificado las distintas poblaciones regionales. Puesto que muchos de los nuevos ambientes que ocupa la lubina no reproducen con fidelidad las condiciones de los estuarios nativos, nos permiten adquirir un conocimiento más detallado de los requerimientos de



apreciadas por los pescadores, prosperan en agua dulce; desde entonces, muchos ríos y embalses interiores se han repoblado con lubina listada. Las poblaciones costeras están disminuyendo desde hace varios años, y en verano muere un número insólito de los adultos mayores en las poblaciones de agua dulce.

AGUAS FRIAS MAR ADENTRO
ESTUARIO
BAJIOS CALIDOS
AGUA SUPERFICIAL CALIDA
JUVENILES
PRESAS COSTERAS ABUNDANTES
POBLACION DISPERSA A LO LARGO DEL GRADIENTE TERMICO
ABUNDANTE ALIMENTO DE PEQUEÑO TAMAÑO
PROTECCION FRENTE A LOS DEPREDADORES
ADULTOS
PRESAS ESTUARICAS ABUNDANTES
ADOLESCENTES
PEQUEÑA ZONA ANOXICA

2. GRADIENTE TERMICO que separa las lubinas listadas según la edad; se ha deducido a partir de los datos disponibles sobre las poblaciones de embalses, aguas costeras y estuarios no contaminados en verano. Las diferencias de temperatura preferida, que van desde aguas cálidas (alrededor de 26 grados Celsius) para los juveniles a frías (alrededor de 20 grados) para las hembras adultas, permiten que el espacio y los recursos alimentarios se repartan de tal manera que se logre la máxima supervivencia en todos los estadios de la vida. Las limitaciones de tal selección de hábitats por parte de las poblaciones de lubinas listadas derivan del creciente agotamiento del oxígeno en el agua más profunda y de la concentración de sustancias tóxicas en las zonas térmicas preferidas.

la especie en lo que se refiere a su hábitat.

Los nuevos ambientes, en particular los embalses de aguas continentales de Tennessee oriental, han constituido el centro de mis investigaciones sobre los nichos térmicos de la lubina listada. En general los peces no pueden controlar su temperatura corporal, de modo que actúan mejor cuando se encuentran en aguas cuya temperatura les permite operar a un máximo fisiológico. Los peces de una determinada especie o que atraviesan cierto estadio de desarrollo suelen congregarse en aguas que se hallan a su temperatura preferida.

Las lubinas listadas juveniles (de entre un mes y un año de edad) son lo suficientemente pequeñas para que su estudio resulte fácil. Los primeros análisis, realizados por varios investigadores, apoyaban la hipótesis de que los juveniles actuaban mejor a temperaturas bastantes elevadas, entre los 24 y 29 grados Celsius. Mi colega David H. Cox y yo hicimos un detallado estudio de las tasas de crecimiento de las lubinas listadas juveniles a distintas temperaturas y tasas de alimentación; encontramos que el crecimiento era máximo a temperaturas de entre 24 y 26 grados Celsius.

Por el contrario, durante el primer mes de vida la lubina listada actuaba mejor a temperaturas apreciablemente inferiores, cercanas a la temperatura de freza y de desarrollo larvario, que es de 20 grados Celsius o menos. La temperatura preferida tiende a aumentar con el crecimiento de los peces, probable reflejo de una adaptación al característico aumento primaveral de la temperatura del agua.

Resultó mucho más difícil obtener datos fiables sobre los nichos térmicos de lubinas listadas de mayor tamaño. Aunque los registros que sobre esa especie obtuvo en la década de 1930 Daniel Merriman, de la Universidad de Yale, relativos a la costa atlántica, indicaban que raramente se encuentran adultos en aguas de temperatura superior a los 27 grados Celsius, persistía la idea de que los datos sobre los juveniles podían extrapolarse a todas las edades. Unos cuantos experimentos de laboratorio, en los que se trabajó con éxito con adultos grandes, sugerían, por el contrario, una disminución del rendimiento a una temperatura del agua de unos 27 grados y apuntaban una tendencia de los peces a evitar aguas tan cálidas. Pese a su utilidad, esos datos no constituían una base de la que pudieran derivarse juicios fiables sobre el efecto de los vertidos de agua caliente por parte de las centrales de energía. Una de mis tareas de laboratorio era valorar tales descargas, por lo que decidí precisar la importancia del efecto de la temperatura sobre las lubinas listadas de mayor tamaño.

Esta especie no se presta a experimentos de laboratorio, pues alcanza los 90 centímetros de longitud y 30 kilogramos de peso. (La mayor lubina listada capturada por un pescador deportivo pesó 35 kilogramos.) Debió, por tanto, idearse un método para estudiarla en sus hábitats naturales. Nuestro éxito se debe en gran parte a mi colega James M. Rochelle, quien diseñó un transmisor-sensor de temperatura que puede fijarse a peces que nadan libremente. Nos dice dónde se encuentra el pez y cuál es la temperatura del agua en ese punto.

Nuestros primeros estudios de campo con ejemplares equipados con transmisores se centraron en subadultos de dos años de edad que vivían en dos pequeños lagos que antaño habían sido canteras. Los lagos presentan en verano una fuerte estratificación térmica vertical. Como es el caso de la mayoría de los lagos, se caldean en superficie, pero las profundidades permanecen frías. A mediados de verano nuestras lubinas podían seleccionar temperaturas comprendidas entre los 10 y los 30 grados Celsius. Los lagos están bien oxigenados, circunstancia que nos aseguraba que los movimientos de los peces no respondían a un soslayo de las zonas pobres en oxígeno.

Los resultados que mi colega David S. Carroll, mi alumno Larry Little y yo mismo obtuvimos a lo largo de dos períodos de primavera y verano fueron sorprendentes. A principios de primavera los peces tendían a seleccionar el agua más cálida que encontraban a 1,5 metros o más por debajo de la superficie. A medida que el agua superficial se caldeaba por encima de los 24 grados Celsius, aproximadamente, los peces marcados seguían la zona de 20 a 24

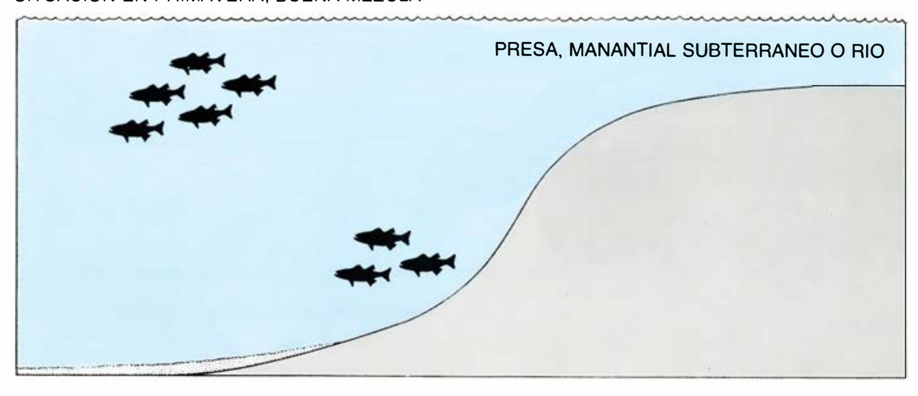
grados hasta profundidades crecientes. A menudo hacían excursiones a aguas más frías y ocasionalmente penetraban en aguas más cálidas, pero nuestro análisis estadístico demostró claramente que ese grupo de edad buscaba un nicho térmico centrado alrededor de los 22 grados.

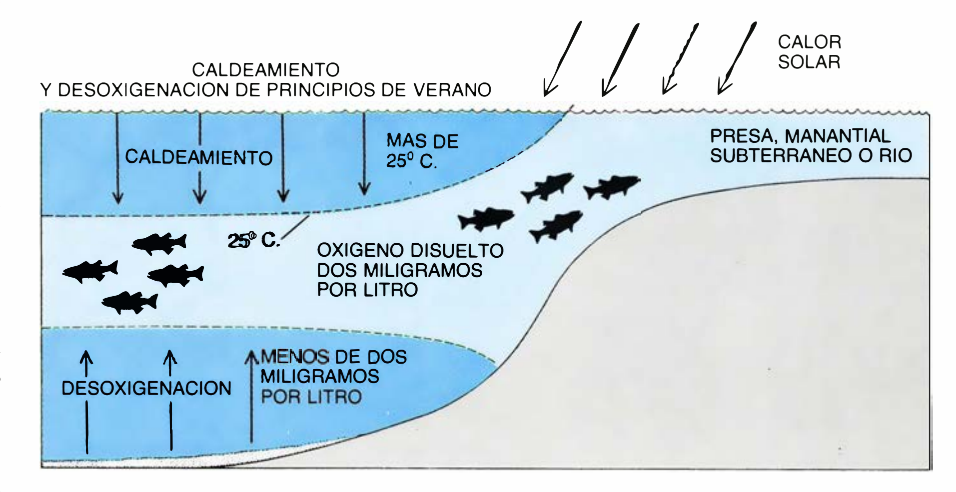
Durante esos mismos años intentamos, con poco éxito, marcar y seguir adultos en un embalse abierto. Escogí el Cherokee Reservoir, un gran embalse (87 kilómetros de longitud y 12.000 hectáreas de superficie) del río Holston, Tennessee. Me indujo a ello saber que una central de energía caldeaba el flujo de entrada en la cabecera del embalse y que los aficionados a la pesca deportiva de éste estaban consternados ante la misteriosa muerte estival de las lubinas listadas de mayor tamaño a partir de 1971, unos siete años después de dar comienzo un programa de repoblación anual del embalse con juveniles. La situación era ideal: nuestro laboratorio necesitaba información sobre el efecto de los vertidos de las centrales de energía sobre la lubina listada y la Wildlife Resources Agency de Tennessee quería saber qué mataba a los adultos mayores.

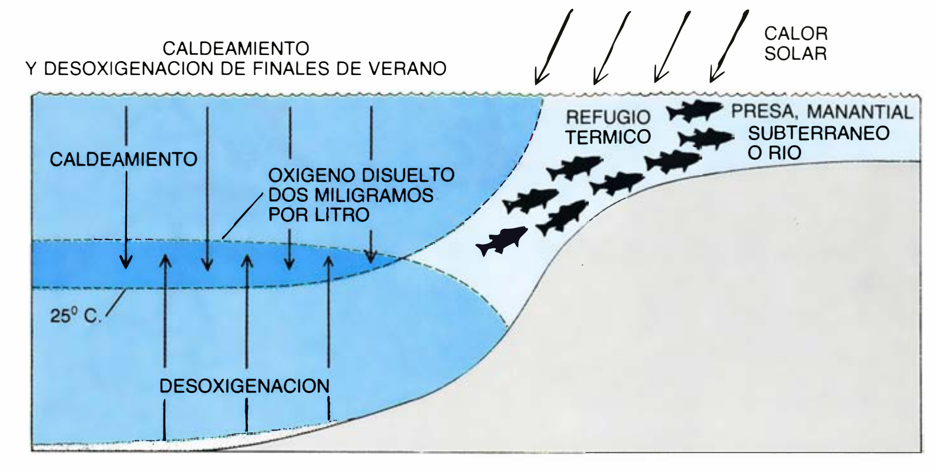
Nuestro primer problema fue encontrar peces para marcar en verano. De nada sirvieron nuestros títulos universitarios: tuvimos que acudir a un guía de pesca, quien nos mostró los lugares adecuados donde encontrar lubinas listadas. El segundo problema fue que, salvo uno, los muchos peces que marcamos durante nuestros estudios iniciales murieron durante las dos horas siguientes a la suelta. En todos los casos el pez efectuaba varios movimientos rápidos entre la superficie, donde la temperatura era superior a los 25 grados Celsius, y profundidades medias a una temperatura de 23 o 24 grados. El único pez que marcamos con éxito en esta serie permaneció en agua fría (alrededor de los 21 grados) después de su inmersión inicial.

No resolvimos el problema de tan sorprendente comportamiento hasta advertir que el único pez que se salvó se había devuelto al agua cerca del punto de captura, mientras que los demás se soltaron a cierta distancia, porque el bote había derivado mientras los marcábamos. Investigando el fenómeno descubrimos que el agua fría de la zona de captura procedía de la corriente de un manantial que vertía en el embalse por aquel punto. El agua fría se hundía, por ser más densa que el agua cálida de los niveles de superficie.

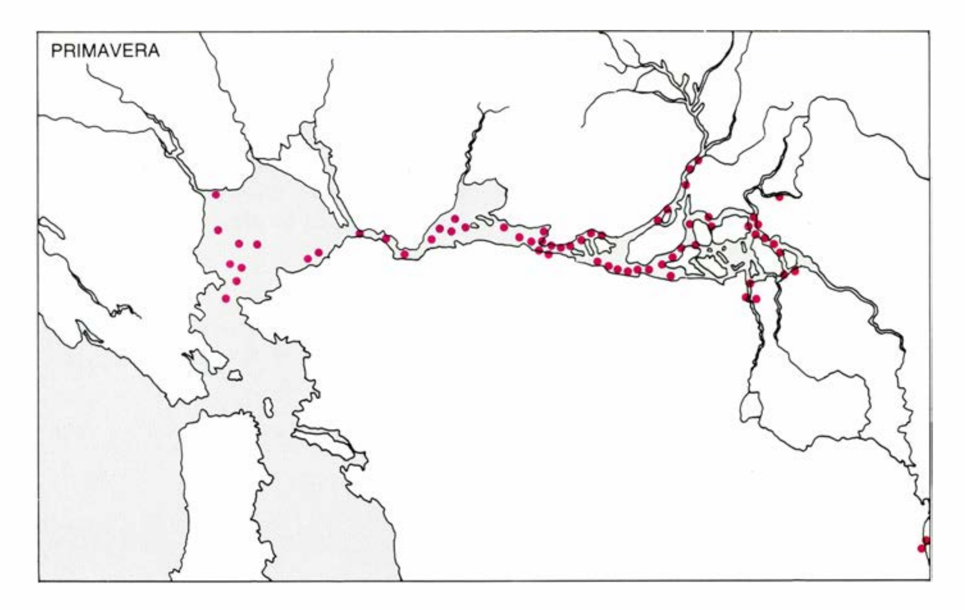
Resiguiendo las evoluciones del único pez superviviente durante varios días, mientras éste vagaba arriba y abajo del canal producido por el frío riachuelo sumergido, descubrimos que buscaba temperaturas que iban de los 18 a los 25 grados Celsius, centrándose en los 22,5. En el embalse principal encontramos, sobre todo, temperaturas de 25 grados o más. Había otros puntos fríos, algunos bien conocidos por los guías de pesca locales, pero en la ma-

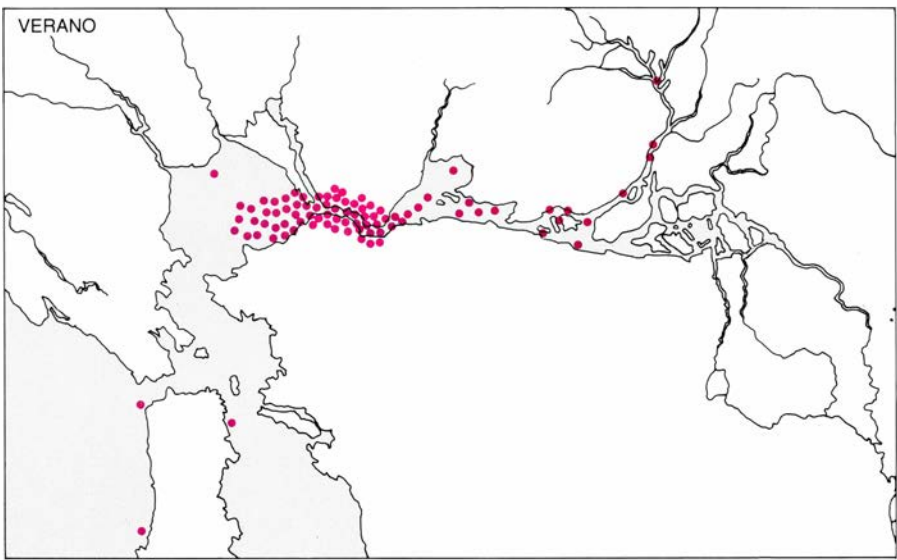


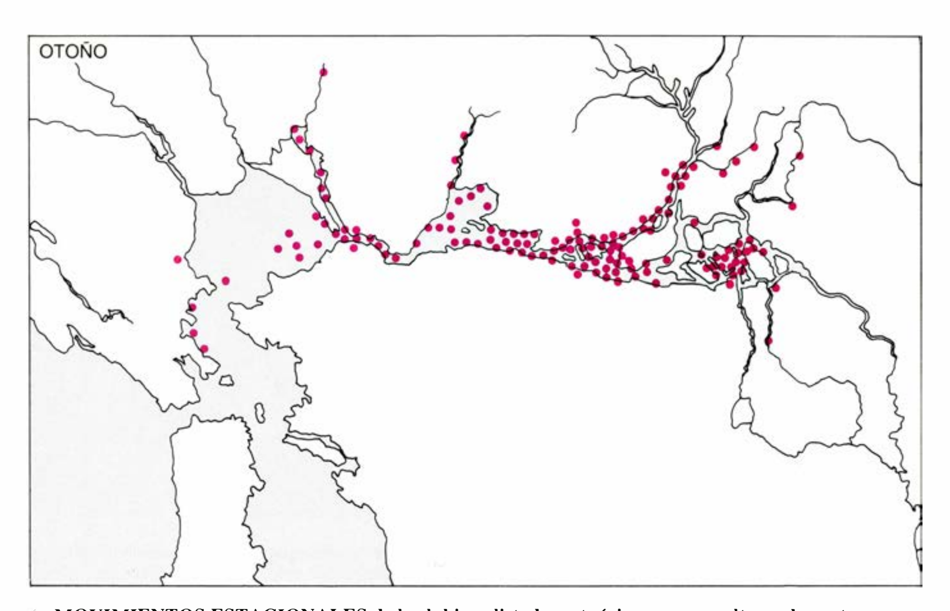




3. CONDICIONES ADVERSAS a las lubinas listadas adultas que pueden aparecer en verano en un embalse de agua dulce. El ejemplo de la ilustración corresponde al Cherokee Reservoir, Tennessee. El caldeamiento del agua próxima a la superficie y el empobrecimiento en oxígeno del agua del fondo debido a la descomposición de materia orgánica reducen los hábitats adecuados para los peces. El hábitat idóneo para un adulto tiene una temperatura inferior a los 25 grados Celsius y al menos dos milígramos de oxígeno disuelto por litro de agua. Ese tipo de aguas frías son las que proceden de una presa, río o manantial; permanecen por debajo de las cálidas aguas superficiales, con lo que se produce una estratificación térmica. A medida que los juveniles maduran y requieren agua cada vez menos cálida, pueden saturar el espacio de los refugios térmicos, confinando a los adultos en nichos hostiles, donde se hallan sometidos a estrés fisiológico.







4. **MOVIMIENTOS ESTACIONALES de las lubinas listadas estuáricas, que resultan coherentes con un nicho térmico de aguas frías para los adultos grandes. Se indican aquí los de la región de la bahía de San Francisco y del delta fluvial del Sacramento-San Joaquín. Los círculos de color representan peces marcados devueltos por los pescadores desde 1947 hasta 1952. La distribución es uniforme en primavera; en verano se da una concentración compacta, que se mueve río arriba a principios de otoño. Las agrupaciones corresponden al movimiento de la zona donde la temperatura del agua oscila entre los 18 y los 21 grados Celsius.**

yoría de las zonas más frías y profundas del embalse tendía a escasear el oxígeno disuelto.

Esta pauta de residencia veraniega en refugios fríos del embalse Cherokee se documentó detalladamente durante los estudios realizados en 1977 y 1978 por mis alumnos Harold Waddle y Barbara Schaich. Esos dos años, los peces marcados de mayor tamaño, que pesaban hasta 12 kilogramos, escogieron temperaturas más frías que los de menor talla.

En perspectiva nuestros primeros fracasos de marcado aparecen como valiosas cronologías de la encerrona fatal a que se sometió a los peces que murieron. Las temperaturas eran demasiado altas en superficie y no había oxígeno suficiente en el fondo. Un pez marcado que se soltara fuera de su refugio térmico no sobreviviría más de un par de horas. Cabría atribuir su muerte a la alternancia entre agua demasiado cálida y agua que carecía de oxígeno suficiente, sin olvidar la fatiga producida por los frenéticos movimientos de subida y bajada en busca del ambiente adecuado.

¿Guardaba ese descubrimiento alguna relación con las misteriosas muertes naturales que padecían cada verano las grandes lubinas listadas? La historia de esas pérdidas en el embalse Cherokee y en otros varios embalses del sudeste de los Estados Unidos es coherente con el modelo que considera una reducción de la temperatura preferida a medida que los peces crecen y ocupan progresivamente el limitado número de refugios térmicos de que disponen los adultos.

Mientras realizábamos nuestros experimentos de marcado nos topamos con varias lubinas listadas grandes (cinco kilogramos o más) muertas. Efectuada la autopsia a varias de ellas, las encontramos en un estado debilitado, y que empeoraba a medida que avanzaba el verano. Solían presentar el estómago vacío (a pesar de la abundancia de pececillos presa en las aguas superficiales), la vesícula biliar hinchada y oscura (señal de un bajo nivel de actividad digestiva) y númerosas úlceras corporales.

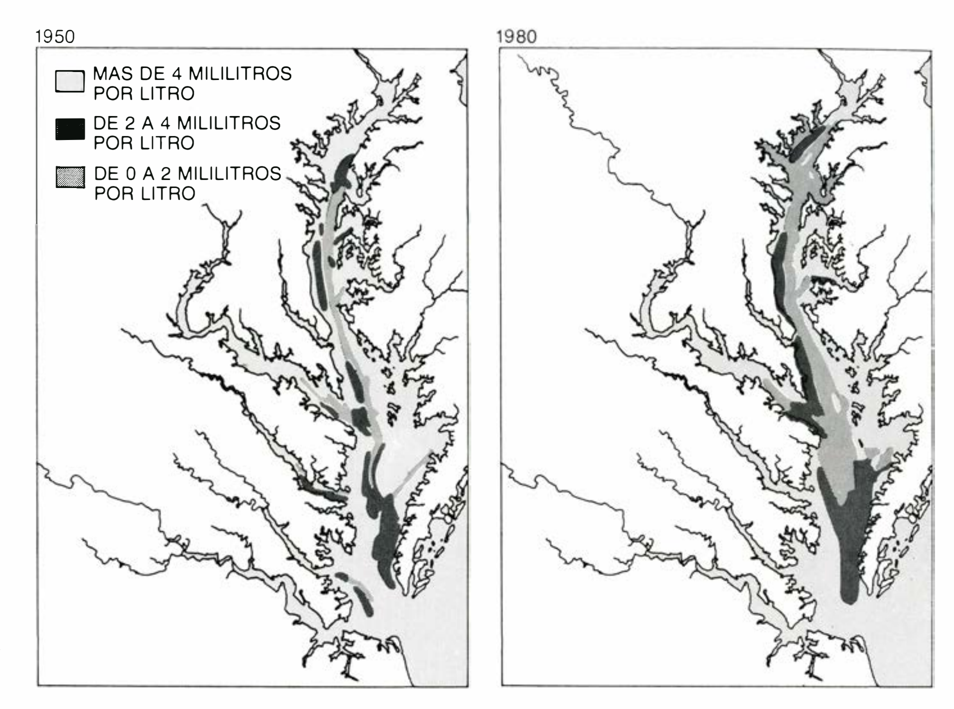
A nuestro entender, ese lamentable estado físico es consecuencia del hacinamiento en los refugios térmicos. En esas condiciones, la disponibilidad de alimento disminuye rápidamente. Además, el estrecho contacto entre los peces aumenta la transmisión de enfermedades, y ello precisamente cuando

la capacidad de resistencia a la infección está menguada por una nutrición deficiente.

El requerimiento de temperaturas bajas debe ser muy importante. Las lubinas listadas hambrientas no se aventuran en aguas cálidas situadas a dos o tres metros por encima en busca de las abundantes presas de esa zona. A medida que se debilitan quizá pierdan la capacidad de seleccionar las temperaturas apropiadas, o las expulse de los refugios la competencia con individuos más robustos.

Efectuamos otro descubrimiento, bastante desconcertante: las estresantes condiciones estivales del embalse Cherokee limitaban la capacidad reproductora de las hembras. La población del Cherokee, en comparación con las lubinas listadas de otros dos embalses, mostraba un porcentaje inferior de hembras capaces de frezar, peor fecundación de los huevos, menos proporción de eclosiones y una supervivencia inferior de las larvas. Puede que las hembras desnutridas no aporten a los huevos las reservas alimentarias necesarias para que el embrión y la larva lleguen a alcanzar el estadio de alimentación libre.

Sorprendentemente, en verano el agua recalentada de la central de energía de la cabecera del embalse no producía efecto discernible alguno sobre las lubinas listadas. La actividad humana que las afectaba era la central hidroeléctrica de la presa del Cherokee. El agua extraída para generar energía reducía el volumen de agua fría del embalse principal, aumentaba el volumen de las capas superiores que caldeaba el sol y apartaba agua del fondo, con poco oxígeno, desde las regiones productivas del embalse, aguas arriba, hasta las zonas más cercanas a la presa. Así, a los ecólogos se les plantea el reto de conocer con más detalle los procesos físicos y químicos que reducen el nivel de oxígeno y elevan la temperatura en hábitats de los embalses que, de otro modo, resultarían adecuados para la lubina listada.



5. EMPOBRECIMIENTO EN OXIGENO de las aguas frías de la bahía de Chesapeake que quizás haya contribuido a la disminución de las poblaciones de la lubina listada. Desde 1950 las zonas pobres en oxígeno se han expandido bastante. Estos datos fueron recopilados para la Agencia de Protección Ambiental.

¿Constituye el comportamiento asociado a la edad en la lubina listada del embalse Cherokee un fenómeno más complejo? Ahondamos en la cuestión de dos maneras. Realizamos un estudio telemétrico de la lubina listada en otro embalse que, pese a diferir considerablemente en su aspecto físico del Cherokee, ofrecía los mismos nichos térmicos. El otro enfoque consistió en revisar la bibliografía que trataba de la respuesta de las lubinas listadas, por toda Norteamérica, a diversas condiciones de temperatura y oxígeno disuelto.

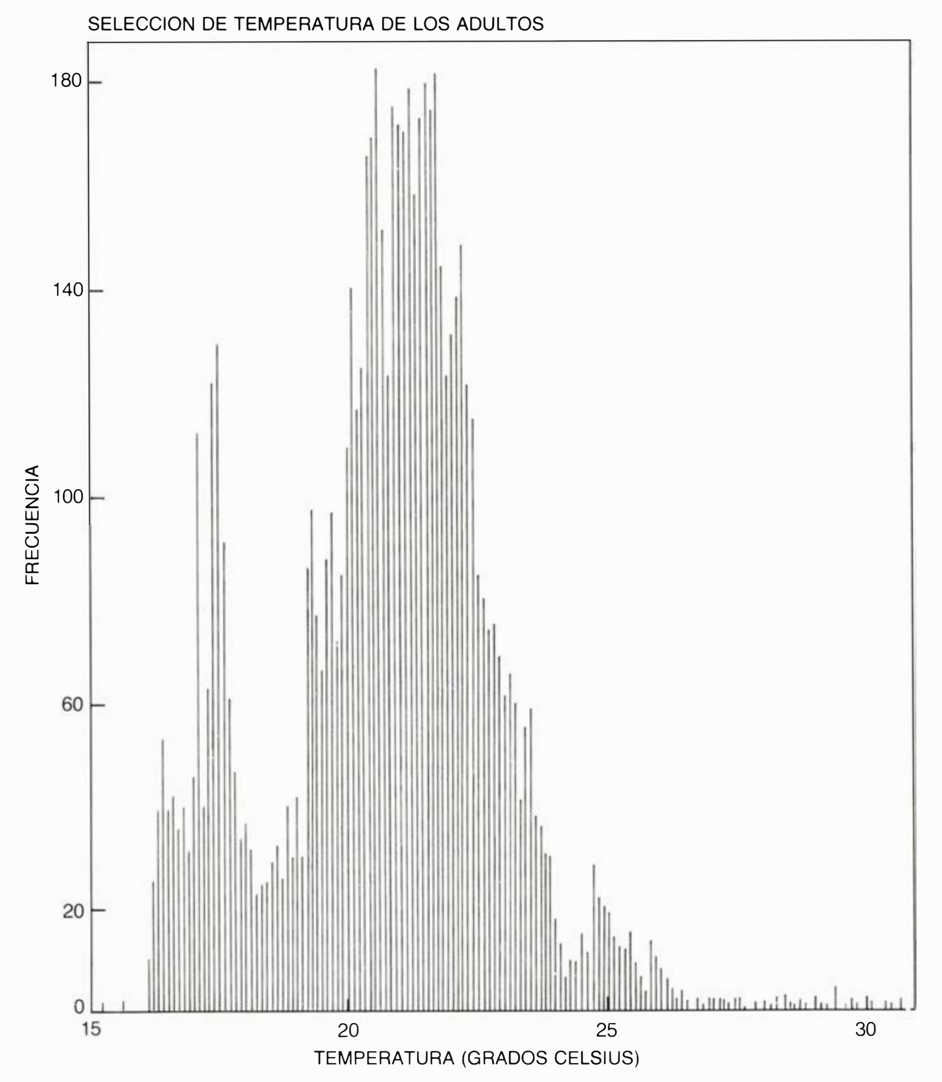
El estudio de telemetría se efectuó en el embalse de Watts Bar, en el río Tennessee, que difiere del Cherokee en que recibe agua fría de una presa situada curso arriba. El agua fría entra en un afluente principal, el río Clinch, antes de mezclarse con el agua más cálida del embalse principal, y juntas forman un gradiente térmico horizontal de considerable longitud. Terry E. Cheek, alumno de licenciatura, Michael J. Van Den Avyle, de la Universidad Politécnica de Tennessee, y yo mismo encontramos en un estudio de 16 meses de duración que las lubinas listadas adultas que habíamos marcado mostraban la misma pauta de selección térmica que los peces del embalse Cherokee. Abandonaban las aguas cálidas y pobres en oxígeno del embalse principal para dirigirse en verano a las aguas más frías del afluente, dispersándose en otoño al enfriarse el embalse principal.

El material bibliográfico, que cubre numerosos estudios tanto en aguas dulces como en agua salada, apoya asimismo la idea de que el gradiente de temperatura de 18 a 25 grados Celsius forma un nicho térmico para las lubinas listadas adultas. Por ejemplo, las lubinas listadas nativas de Florida, que permanecen en ríos, se congregan en grandes manantiales (de temperatura cercana a los 21 grados) cuando la temperatura del río sube por encima de los 26 grados. En esos refugios fríos se las ha visto hacinadas en gran densidad, en un estado físico deplorable y enfermas. El movimiento de las grandes lubinas listadas hacia las aguas frías descargadas desde presas parece constituir un fenómeno común en el sudeste de los Estados Unidos. El cambio de distribución, según las estaciones, de esa especie en los estuarios de la costa Este y en la bahía de San Francisco también concuerda de modo general con las temperaturas preferidas observadas en los estudios que nuestro grupo efectuó en embalses.

Pueden citarse otras muchas pruebas que sostienen la hipótesis de que la preferencia térmica de la lubina listada cambia con la edad de los peces. Las tasas de crecimiento que registran los juveniles de poblaciones salvajes son máximas a las temperaturas relativamente altas de las latitudes meridionales, mientras que los adultos crecen más rápidamente en las temperaturas relativamente bajas de las latitudes septentrionales. Las lubinas listadas introducidas en embalses que en verano tienen una buena diversidad térmica y suficiente oxígeno crecen bien a todas las edades.

Los datos aportados parecen convincentes, e iluminan otras muchas observaciones. Por ejemplo, las conspicuas

migraciones estacionales, específicas de la edad, de la lubina listada en estuarios y aguas costeras parecen explicarse mejor ahora por preferencias térmicas que por la vaga noción de "persecución del alimento" que anteriormente se había formulado. La tendencia de los adultos mayores a viajar más lejos en aguas costeras más frías es coherente con su preferencia por una temperatura más baja a medida que envejecen. En el este, las migraciones anuales que llevan a las lubinas listadas adultas frente a las costas de Nueva Inglaterra meridional, en verano, y a las aguas situadas frente a las Carolinas, en invierno, concuerdan con las localizaciones estacionales de las aguas cuya temperatura es de unos 20 grados Celsius. También es significativo que las lubinas listadas que habitan a lo largo de la costa del golfo de México vivan en ríos y no en estuarios. El agua del Golfo es uniformemente cálida, mientras que los ríos presentan puntos fríos donde afluyen manantiales.



6. TEMPERATURA DEL AGUA preferida por las lubinas listadas adultas, que es inferior a la temperatura del agua que más comúnmente frecuentan los juveniles. Los datos expuestos en los dos gráficos, típicos de la lubina listada, ilustran los movimientos de varios juveniles en un depósito de laboratorio que presentaba gradientes térmicos y de un adulto marcado en el embalse Cherokee durante el verano de 1977.

¿Puede contribuir a la gestión de poblaciones en decadencia o en peligro la importancia que, según se acaba de descubrir, tiene la temperatura para la lubina listada, en particular la necesidad decisiva de los adultos por el agua fría? Nuestros datos se refieren especialmente a las poblaciones de embalses. Pertrechados con la certeza de que los juveniles necesitan agua caliente y los adultos agua fría con una cantidad adecuada de oxígeno, pueden escogerse embalses suceptibles de repoblación atendiendo a su ciclo anual de condiciones físicas y químicas. Además, a veces cabe manipular la temperatura estacional del agua, por ejemplo soltando caudal de una presa. El aporte de oxígeno puede mejorarse controlando los materiales consumidores de oxígeno que penetran en el agua. Limitando la tasa de repoblación y aumentando la extracción, en particular de peces de dos años de edad, se evitaría la saturación de los limitados espacios estivales de refugio en embalses que son cálidos y con déficit de oxígeno.

Resulta menos seguro que la información sobre los nichos térmicos pueda aplicarse a la gestión de las poblaciones costeras. Cabe esperar recompensas sustanciales si esa información se demuestra de utilidad. El Estudio Preferente de la Lubina Listada, coordinado por el Fish and Wildlife Service y el National Marine Fisheries Service de los Estados Unidos, estimó que la reducción del 90 por ciento en la pesca comercial a lo largo de la costa Este, desde 1973 hasta 1980, había destruido 7000 puestos de trabajo y causado una pérdida en salarios que se estima en 220 millones de dólares por año. Las vedas sobre la pesca impuestas por los estados de Maryland y Delaware en 1985 para contener la reducción de la población han aumentado los efectos económicos del problema de la lubina listada. Si la temperatura constituye un factor clave en la ecología de la especie, la búsqueda de cambios en el espacio de los nichos térmicos donde las poblaciones se encuentran amenazadas

ayudaría a explicar las pérdidas y a sugerir medidas reparadoras.

Una posibilidad es que las lubinas listadas se congreguen en zonas estuáricas muy contaminadas debido a la prevalencia, en esos puntos, de temperaturas favorables, quedando entonces expuestas a elevados niveles de toxicidad. Tal pauta explicaría la agregación estival de lubinas listadas en la zona de la bahía de San Francisco y el descubrimiento, por parte de Jeanette A. Whipple y Maxwell B. Eldridge, del National Marine Fisheries Service, de que esos peces portan una considerable cantidad de material tóxico en su cuerpo. A tales regiones debiera dárseles prioridad en el control de la contaminación.

Uno de los cambios más espectaculares en el hábitat de la lubina listada a lo largo de la costa Este es la reducción estival del contenido de oxígeno de las aguas más frías de la bahía de Chesapeake. El río Chesapeake ha constituido durante años el proveedor de la mayoría de las lubinas listadas jóvenes que posteriormente se encuentran ya adultos en la bahía y en las aguas costeras, y es esa población la que se está reduciendo con mayor rapidez. Un estudio de la bahía, realizado en el verano de 1980 por Kent Price y sus colegas para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, mostró una distribución de oxígeno y temperatura que recordaba las peores condiciones registradas en el embalse Cherokee; sencillamente, a juzgar por el muestreo realizado, no había aguas adecuadas para las lubinas listadas grandes. Además, el volumen de agua que carece de oxígeno o contiene muy poco ha aumentado considerablemente desde alrededor de 1970, y el comienzo anual de la situación de poco oxígeno se produce ahora antes. Las causas principales parecen ser el gran crecimiento de la población humana de la zona y un aporte creciente de nutrientes procedentes de la agricultura.

¿Afecta de modo importante esa situación de deterioro progresivo de la temperatura y del contenido de oxígeno a las lubinas listadas que tienen acceso al océano abierto, como es el caso de la población de la bahía de Chesapeake? Puesto que no podemos estar seguros de ello, la prudencia aconseja que investigadores y administradores examinen a fondo la posibilidad de que la lubina listada del Chesapeake tenga que hacer frente a la desaparición de los nichos térmicos que hasta ahora han constituido su hábitat natural.

El nacimiento de la civilización maya

No surgió de repente como se creía hasta hace poco, sino que fue un proceso gradual. La civilización se había afianzado mucho antes del comienzo del período clásico, en el año 300 de nuestra era

Norman Hammond

¿Cómo surge una gran civilización? ¿Emerge en plena madurez tras un simple período de transformación cultural o es el florecimiento final de un largo proceso al que da lugar la paciente acumulación de múltiples transformaciones? Estos son los dos extremos de un amplio abanico de posibilidades. Aunque admitamos que la visión que los especialistas tienen de una cultura cambie de posición de vez en cuando, de modo casi imperceptible, dentro de esa gama, parece inverosímil que la opinión formada de una cultura pueda moverse de un extremo a otro del espectro. Sin embargo, esto es exactamente lo que ha ocurrido en el caso de la civilización maya. Y lo que resulta todavía más destacable es que ese cambio, que constituye una verdadera revolución en nuestros conocimientos acerca de los orígenes de la civilización maya, se ha producido en poco más de una década.

Desde hace tiempo resulta claro que los mayas, que ocuparon la península de Yucatán además de parte de Belize, Guatemala, El Salvador y Honduras, desarrollaron una de las civilizaciones más complejas de cuantas existieron en toda la América indígena. En su época de máximo esplendor durante el período Clásico (desde aproximadamente el año 3000 al 900 d. C.), la sociedad maya estaba muy estratificada, con un gobernante situado en la cúspide de una pirámide formada por seis o siete clases sociales nítidamente definidas. Disponía de una compleja cosmología en la que tenían cabida los dioses, las fuerzas de la naturaleza y los antepasados. Contaba con un elaborado calendario que proporcionaba la estructura adecuada a los acontecimientos rituales e históricos. Los rituales se celebraban en centros ceremoniales que constituían el corazón de las grandes ciudades. Esta superestructura cultural descansaba sobre el cultivo del maíz y se habían desarrollado técnicas que permitían la explotación de las tierras pantanosas y las escarpadas laderas de los montes.

Diez años atrás creíase todavía que la civilización maya clásica había surgido, de forma bastante repentina, durante la tercera centuria de nuestra era. Se consideraba que el período anterior, llamado Preclásico o Formativo, había sido una época dominada por pequeñas sociedades de agricultores que vivían en humildes aldeas. Pero desde 1975, el descubrimiento de un número elevado de nuevos datos y la revisión de los que ya se conocían han transformado de raíz la visión comúnmente aceptada de la cultura preclásica. Se ha descubierto que la agricultura intensiva, realizada mediante una técnica más elaborada que la de tala y quema, se había desarrollado antes de lo que se pensaba. Los imponentes edificios que han sido datados en los años del Preclásico implican la existencia de una compleja organización social y económica. Las excavaciones recientes revelan que había talleres en los que se fabricaban a gran escala útiles de trabajo según modelos estandarizados, y que con ellos se llevaba a cabo un intenso comercio entre puntos muy alejados. Parece que incluso algunos elementos de la cultura intelectual del Clásico habían aparecido en tiempos del Formativo. Como consecuencia de tales hallazgos, la cultura preclásica no parece ya constituir un lejano precedente. Por el contrario, diríase que constituyó (al menos en su culminación) la primera fase de la gran civilización maya.

Una de las razones en que se han apoyado los estudiosos para aceptar la idea de la existencia de un desarrollo social avanzado durante el período Preclásico ha sido el descubrimiento de que los antepasados de los mayas ocuparon el territorio mucho antes de lo que hasta hace poco se creía. Hasta 1975, la fecha de ocupación más antigua se basaba en una fecha de radiocarbono correspondiente a una fecha calendárica aproximada al año 900 a. C. (Por encima del año 400 a. C. se produce una discrepancia entre las fechas calendáricas y las del radiocarbono. Las fechas del radiocarbono se calibran con las del calendario mediante los árboles de *Pinus longeva*, cuya edad podemos conocer. Hacia el 900 a. C., la discrepancia es de unos 200 años, por lo que la fecha no calibrada es señalada con letras minúsculas: 700 a. c.). Desde 1975 la antigüedad de la ocupación se ha multiplicado por cinco. Ahora no parece haber muchas dudas acerca de que los ancestros de los mayas y sus descendientes habitaron continuadamente el territorio desde las postrimerías de la última glaciación, hace 10.000 años.

El adelanto de las fechas de ocupación del territorio afecta a las tres regiones donde habitaron los mayas: las tierras altas volcánicas de Guatemala, las tierras bajas de Belize cubiertas de bosque tropical y las bajas llanuras de la península de Yucatán de escasas precipitaciones y vegetación rala. En la cueva de Loltun, en los montes Puuc de Yucatán, Norberto González Crespo y Ricardo Velásquez Valádez, del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México, han descubierto una larga secuencia de horizontes culturales. Los estratos más antiguos, situados en el extremo de la secuencia, parece que contienen huesos de especies de animales (tales como el caballo nativo) que se extinguieron inmediatamente después del final de la glaciación del

Pleistoceno. Desgraciadamente, hasta ahora sólo disponemos de una única fecha de radiocarbono para la secuencia de Loltun. Esa fecha, hacia el 2300 a. C. (1800 a. c.), señala el final de los estratos precerámicos y la aparición de las primeras muestras de alfarería.

En Belize se han encontrado varias puntas de proyectil hechas de piedra que tienen un gran parecido con las utilizadas por los cazadores de grandes animales de la cultura Clovis, que habitaron en la región de las grandes llanuras de los Estados Unidos hace entre 12.000 y 10.000 años. De los hallazgos de Belize, el mejor conocido es la Punta Ladyville, descubierta por un equipo de la Universidad de Texas en San Antonio dirigido por Thomas R. Hester. Richard S. MacNeish, de la Universidad de Boston, ha hecho otra serie de hallazgos que complementan las pruebas ofrecidas por la Punta Ladyville. MacNeish sugiere que sus hallazgos se pueden situar en una secuencia que se extiende desde el 9000 hasta el 2500 a. C. En un lugar llamado Los Tapiales, situado en las tierras altas de Guatemala, han aparecido puntas del tipo Clovis asociadas con ar-



1. NUEVE CABEZAS DE JADE componen un par de ofrendas rituales encontradas en dos yacimientos arqueológicos mayas. Las cuatro cabezas de la fila superior fueron halladas por el autor en Nohmul, un lugar al norte de Belize. Las cuatro de la fila inferior y la que aparece solitaria las encontró David A. Freidel, de la Universidad Metodista del Sur, en Cerros, a 28 kilómetros de Nohmul. En opinión del autor, ambos grupos incluyen la misma serie de deidades: dos representaciones del dios solar (*la primera y la segunda por la izquierda*), una del dios del maíz (*la segunda por la derecha*) y otra del dios de las tinieblas (*la primera de la derecha*). Las dos series de cabezas fueron talladas entre los años 100 a. C. y 100 d. C., durante el período Preclásico Tardío. La correspondencia entre representaciones procedentes de distintos lugares sugiere que mucho antes de los comienzos del período Clásico, en la tercera centuria de nuestra era, se había desarrollado una cultura intelectual común a gran parte de las comunidades mayas, lo que se consideró en un principio el punto de arranque de la civilización maya. La cabeza solitaria de la parte inferior podría representar la dualidad de la vida y la muerte, un tema común en el arte precolombino posterior. Su lado izquierdo, cortado, podría figurar una calavera y, el derecho, una cara viva. (Fotografías tomadas por el autor del artículo.)

tefactos que proporcionan fechas de radiocarbono de hace aproximadamente 10.000 años. Una investigación realizada por Kenneth L. Brown, de la Universidad de Houston, en los alrededores de la región de El Quiché reveló la existencia de muchos lugares precerámicos datados antes del año 2500 a. C.

El efecto acumulativo de los hallazgos recientes ha venido a demostrar que la totalidad del área maya había estado ocupada por el hombre en una fecha muy temprana, unos 8000 años antes del comienzo del período Clásico. Además, existen grandes probabilidades de que los primitivos habitantes del área fueran los antepasados directos de los mayas del Clásico. La antigüedad de la fecha de ocupación permite pensar en la existencia de una civilización preclásica más atractiva de lo que hasta ahora se creía, ya que la sociedad dispuso de más tiempo para su desarrollo. Durante los 8000 años que precedieron al nacimiento de la gran cultura clásica, los antepasados de los mayas contaron con tiempo suficiente para construir los cimientos económicos y tecnológicos de la civilización.

Uno de los más decisivos de esos cimientos es la agricultura, una cuestión sobre la que han tenido gran repercusión los recientes hallazgos. Hace una década se pensaba que la aparición de las comunidades sedentarias de agricultores tuvo lugar hacia el año 900 a. C. Ahora sabemos que la fecha real está entre los años 2500 y 1250 a. C. (2000 y 1000 a. c.). En Cuello, al norte de Belize, donde yo dirigí una expedición de la National Geographic Society entre 1978 y 1980, las fechas del radiocarbono sugieren que los primeros asentamientos de agricultores sedentarios se levantaron hacia el 2500 a. C. (2000 a. c.). La cronología del radiocarbono de Cuello ha dado lugar a controversias, pero ni siquiera las críticas más conservadoras sitúan el comienzo de la secuencia cultural después del 1500 a. C. (1200 a. c.).

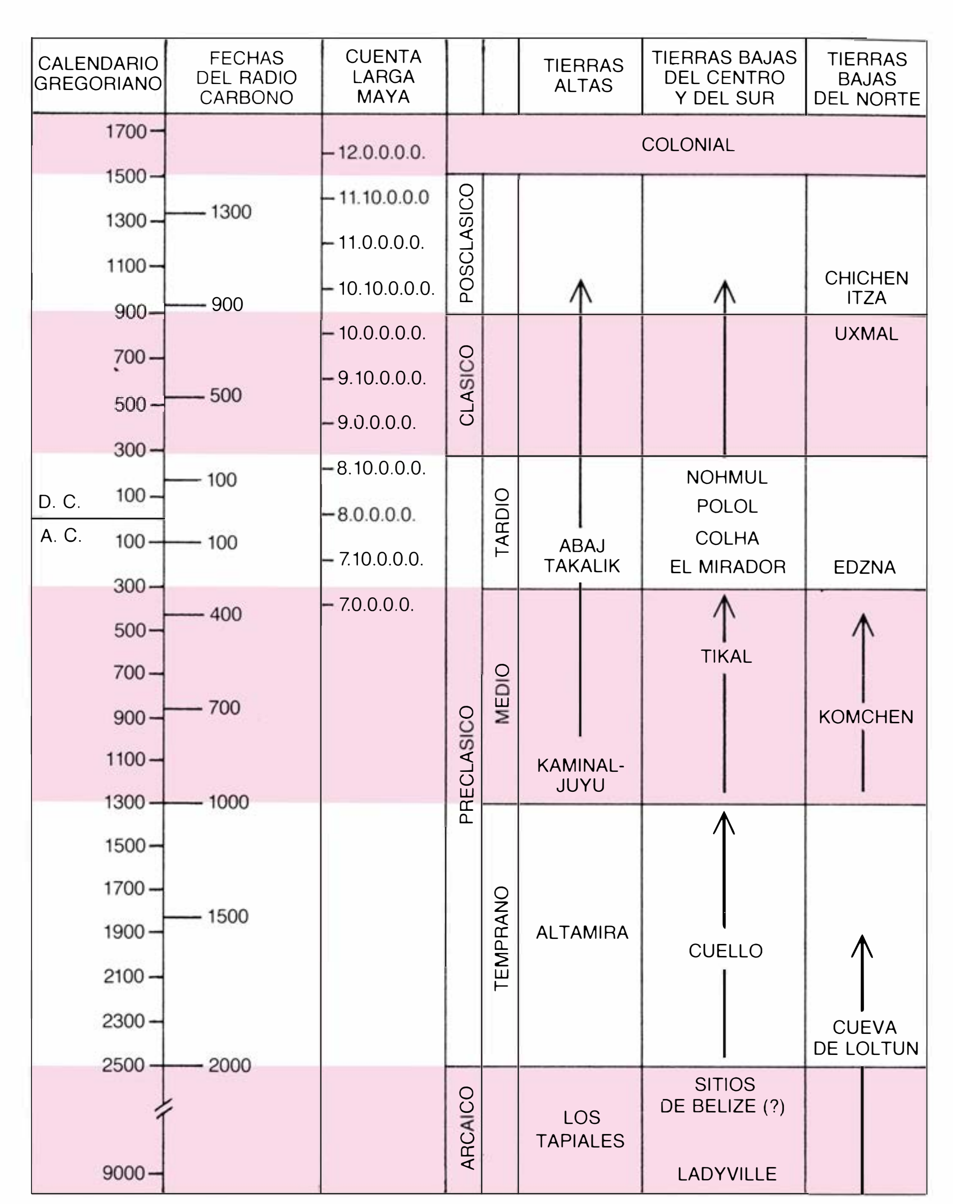
Los primeros cultivadores de maíz de Cuello forman parte de la historia del período Preclásico Temprano que concluyó hacia el año 1250 a. C. El cultivo del maíz no era la única innovación cultural de que disponían los habitantes de Cuello en el Preclásico Temprano. Construyeron también plataformas para viviendas con superficies estucadas alrededor de plazas y edificaron sobre ellas habitaciones con estructura de madera y cubierta de pajón. Hicieron cerámica fina de diversos colores y formas. Durante el período siguiente, el Preclásico Medio que se extendió desde el 1250 al 450 a. C. (400 a. c.), el repertorio cultural de los hombres de Cuello creció con la expansión de las redes de comercio interregional. Por medio de estas redes comerciales llegaba a las tierras bajas obsidiana de los yacimientos próximos a la ciudad de Guatemala y jade procedente de las tierras centrales del norte de Guatemala.

A pesar del incremento del comercio, la sociedad maya de los comienzos del Preclásico Medio mantenía el carácter de aldeas de agricultores, lo cual corresponde básicamente con el cuadro aceptado hasta ahora de la vida durante el período Preclásico. Sin embargo, más tarde –durante el Preclásico Medio– se produjeron cambios trascendentales que comenzaron a elevar a la sociedad maya por encima del nivel de las aldeas agrícolas. Esos cambios, que se concentraron en las tres centurias precedentes al 450 a. C., no son todavía bien conocidos. Aparecen además dificultades considerables en el camino de su comprensión, dado que los artefactos que es necesario analizar para conocerlos plenamente se encuentran en muchas ocasiones enterrados bajo montañas de materiales procedentes de construcciones posteriores. Pero





2. EL TERRITORIO MAYA comprende zonas de México, Guatemala, Belize, oeste de Honduras y El Salvador. La región se distingue por su variedad de relieves geográficos, que van desde las tierras altas volcánicas de Guatemala meridional, pasando por las tierras bajas de Belize y Guatemala cubiertas de bosque tropical, hasta la llana y descendente península de Yucatán donde las precipitaciones son escasas. Muchos de los yacimientos que han contribuido a la reciente reevaluación de la prehistoria maya se ubican en el bosque húmedo tropical de las tierras bajas del norte. En la actualidad se encuentran pueblos maya-hablantes por toda el área ocupando la misma variedad de ambientes que sus antepasados, aunque lo que entonces era un denso corazón de las tierras bajas del norte de Guatemala está ocupado hoy sólo por campesinos y aldeas.



3. CRONOLOGÍA MAYA, susceptible de contarse de diversas formas, como se aprecia en este cuadro. La primera columna representa las fechas en el sistema del calendario gregoriano. La segunda columna muestra fechas de radiocarbono sin calibrar; éstas difieren de las fechas del calendario gregoriano en una cantidad de años que se va incrementando de manera constante a intervalos de 100 años, conforme nos alejamos del comienzo de nuestra era. La tercera columna corresponde al sistema calendárico maya. El calendario maya consistía en una progresión lineal de días, meses y años divididos en períodos de 400 años que recibían el nombre de *baktunob*; el comienzo del calendario estaba fijado en el año 3114 a. C., que coincidía con la más reciente de las diversas creaciones del universo. La cuarta, quinta y sexta columnas muestran los períodos en que los especialistas han dividido la historia del desarrollo de la cultura maya en las tres principales zonas ocupadas por este pueblo. Los hallazgos recientes han movido hacia atrás las fechas de ocupación humana del área maya desde el 900 hasta el 9000 a. C., y muestran cómo muchos de los elementos fundamentales de la civilización maya habían aparecido durante el período Preclásico Tardío (entre el 100 a. C., y el 100 d. C.).

lo que sucedió al final del Preclásico Medio plantea algunos de los interrogantes más importantes de la arqueología del Nuevo Mundo, dado que al comienzo del Preclásico Tardío, en el 450 a. C., había aparecido una sociedad sustancialmente diferente de la sociedad de agricultores aldeanos. De hecho, durante las seis o siete centurias de duración del Preclásico Tardío, surgió una verdadera civilización.

Se hallan trazas de la transformación incluso en sitios tan pequeños como Cuello, que en tiempos del Preclásico Tardío era una aldea grande con un millar de vecinos. El centro ceremonial de la comunidad de Cuello durante el Preclásico Medio estaba formado por un pequeño patio flanqueado por edificaciones de madera construidos sobre plataformas. Hacia el 450 a. C., el patio se había convertido en una amplia plataforma abierta capaz de albergar a una gran audiencia o congregación de personas; en el extremo oeste de la plataforma se erguía una pequeña pirámide. Durante la campaña de excavación de 1980 descubrimos que la transformación se había realizado rellenando el patio con escombros hasta el nivel de las plataformas circundantes. Los templos de madera habían sido incendiados y las fachadas de sus subestructuras arrancadas en una ceremonia de desconsagración ritual.

En el centro del patio se dejó en el pavimento una depresión en forma de cuenco y en ella se colocaron unas dos docenas de cuerpos humanos descuartizados. Frank y Julie M. Saul, de la Facultad de Medicina de Ohio en Toledo, han analizado los restos y han concluido que todos eran jóvenes; parece que todos varones. Junto a los cuerpos descuartizados había vasijas de cerámica y media docena de cánulas de hueso con incisiones decorativas. Las cánulas podían haber sido puños de instrumentos para sacrificios, tales como los utilizados en los rituales del período Clásico; también podría tratarse de mangos de abanicos de plumas. Pero más importante que la función que desempeñaran es el hecho de que cinco de ellos tienen grabado un dibujo que es claramente identificable como el *pop* maya (una estera tejida con fibras vegetales). El *pop*, usado por los soberanos, equivalía al trono o la corona utilizados en la iconografía moderna como símbolos de la autoridad real.

El descubrimiento de las cánulas grabadas sugiere que, hacia el 450 a. C., había señores que habían establecido tanto el poder real como su expresión simbólica. No se puede pensar, sin embargo, que ninguno de estos gobernantes tuviera autoridad sobre algo más que una pequeña región. Ni siquiera durante el florecimiento del período Clásico la sociedad maya se encontraba unificada bajo un poder central. Por el contrario, su estructura política era semejante a la de la Italia del Renacimiento: un mosaico de unidades políticas independientes, de muy diversa extensión, riqueza y fuerza militar. Los hallazgos de Cuello son demasiado fragmentarios como para demostrar de manera concluyente que las bases de este mosaico político habían sido fijadas hacia el año 450 a. C. Pero un número cada vez mayor de descubrimientos inducen a pensar que, a mediados del Preclásico Tardío (o no mucho antes del nacimiento de Cristo), se había asentado el poder político real.

Un dato que proporciona un apoyo sólido es el hecho de que la población maya creció considerablemente durante la fase preclásica tardía. Hay muchos más yacimientos arqueológicos correspondientes al Preclásico Tardío que al Preclásico Medio, y los recientes tienden a tener mayor tamaño y más densidad de población. Nuestro reco-

nocimiento de la región norte de Belize, llevado a cabo en 1973 y 1974 bajo los auspicios del British Museum y del Proyecto Corozal de la Universidad de Cambridge, reveló que después del 450 a. C. había cuatro veces más sitios arqueológicos en la región que antes de esa fecha. Desde luego, el hecho de que la población creciera no implica por sí mismo el desarrollo del poder político. Sin embargo, el rápido crecimiento demográfico del Preclásico Tardío estuvo acompañado por un incremento en la escala de los proyectos económicos. El alcance de estos proyectos sugiere que estaban dirigidos por gobernantes que poseían una notable capacidad administrativa y una fuerte autoridad.

Un sector en el que sí parece haberse dado autoridad antes de los tiempos del Clásico es en el de la agricultura. De algún tiempo a esta parte se sabe que durante el período Clásico las técnicas de tala y quema coexistieron con formas de cultivo más intensivas que implicaban la modificación del paisaje. Así, en las laderas de las colinas se labraron terrazas. Estas evitaban la erosión al retener la tierra de aluvión y permitían la explotación de tierras que de otro modo serían incultivables. Grandes áreas fueron desbrozadas y aterrazadas simultáneamente, lo que sugiere que el trabajo estaba dirigido desde un único centro de poder. Una vez dividida la tierra en campos aterrazados, pudo haberse asignado a individuos para que la cultivaran. Un nivel similar de organización y autoridad está implícito en los trabajos de drenaje de los parajes pantanosos. En las tierras húmedas de los valles de los ríos y en las cuencas de drenaje lento tales como el Bajo de Morocoy en Yucatán o el pantano de Pulltrouser en el norte de Belize, se abrieron canales para así tener campos bien drenados, transformando las márgenes inundadas en tierra que podía ser cultivada estacionalmente o incluso a lo largo de todo el año.

Las investigaciones recientes sugieren que bastante antes del comienzo del período Clásico se habían desarrollado técnicas semejantes. Los ejemplos más antiguos de campos drenados



4. CAMPOS DRENADOS por los mayas en áreas pantanosas para hacerlas productivas. Los campos que aparecen en la fotografía se encuentran en las cercanías de Nohmul, una gran ciudad del Preclásico Tardío, próxima a la frontera entre México y Belize. El agua se drenaba hacia pequeños canales situados entre los campos cultivados y desde allí se dirigía a otros canales mayores que aparecen a la izquierda del perímetro de los campos cultivables. Excavaciones recientes han mostrado que durante el período Preclásico Tardío los mayas desarrollaron técnicas para drenar campos y construir terrazas en las laderas de las colinas, con lo que consiguieron elevar su agricultura a niveles superiores a los de tala y quema. El autor dirige en la actualidad una excavación en Nohmul financiada por la National Geographic Society y el British Museum. Trabajos posteriores podrían confirmar que los campos proceden del Preclásico Tardío.

proceden de Cerros, en la costa de Belize. El centro ceremonial del lugar preclásico de Cerros está situado sobre una pequeña península separada de la tierra firme por un canal de 1200 metros de largo. Vernon L. Scarborough, que trabajaba en la Universidad Metodista del Sur, mostró que el canal se excavó en algún momento entre los años 200 y 50 a. C. El canal tenía seis metros de anchura máxima y más de dos metros de profundidad en algunos puntos. Al canal principal desembocaban otros menores que drenaban campos que se habían recuperado de una depresión rellena de tierras de aluvión. Dado que el número de campos drenados en Cerros es pequeño, su contribución a la economía local no pudo haber sido importante. Pero su existencia demuestra que la tecnología necesaria para desviar y canalizar los aportes de agua estaba en vías de desarrollo durante los tiempos preclásicos.

Esa conclusión viene sustentada además por el descubrimiento en Edzná, una ciudad situada en la llanura costera de Campeche, de obras hidráulicas de magnitud muy superior a las de Cerros. La estructura principal de estas obras hidráulicas, que datan del Preclásico Tardío, es un canal de 12 kilómetros de largo que corre hacia el sur desde la ciudad hasta el cercano río Champotón. En el extremo norte del canal hay un complejo rodeado por un foso, un recinto ceremonial; en un principio creyóse que se trataba de una fortaleza. El foso, aún relleno en la actualidad, tiene más de 100 metros; la mayor parte de los 253.000 metros cúbicos de tierra y piedra caliza que se extrajeron del mismo se aprovechó para la construcción del centro ceremonial que se llevó a cabo entre el año 200 a. C., y el 100 d. C. Abriéndose en abanico desde el lado norte del centro de la ciudad, hay siete canales más cortos que alimentaban los depósitos y permitían el transporte en canoa. La escala de la construcción de Edzná es sorprendente. Raymond T. Matheny, de la Universidad Brigham Young, ha estimado que en conjunto las obras hidráulicas posibilitaron el embalse de 2,25 millones de metros cúbicos de agua y que para su construcción fue necesario el empleo de 1,7 millones de días-hombre de trabajo.

La existencia de proyectos como los de Edzná y Cerros muestran que las comunidades mayas del Preclásico tenían una economía agrícola basada en un alto nivel de organización colectiva. Hallazgos realizados en Colhá, un lugar situado al sur de Cerros, muestran que también existía una economía manufacturera organizada que proporcionaba el material necesario para el mantenimiento de una red comercial de ámbito regional. Colhá se levanta sobre la línea de tierras pantanosas de la costa este de Belize, sobre una franja maciza de chert. (El chert es una piedra muy semejante al pedernal.) Las primeras excavaciones realizadas entre 1973 y 1975 por el Proyecto Corozal, del que yo era director, probaron que Colhá era un enclave importante durante el Preclásico. El trabajo posterior, llevado a cabo desde 1979 por Hester y Harry J. Shafer, de la Universidad A & M de Texas, ha demostrado la escala alcanzada por la actividad manufacturera desarrollada allí.

En una zona de seis kilómetros cuadrados alrededor del lugar se han identificado casi mil montículos mayas en el curso de las investigaciones realizadas por ambos proyectos. Muchos de los montículos eran plataformas para viviendas, pero Hester y Shafer atribuyen 89 de ellos a talleres de chert y muestran cómo al menos 32 de estos talleres estaban funcionando durante el período Preclásico Tardío. Los restos hallados en Colhá indican que allí se fabricaba una variedad limitada de útiles. Los más comunes eran grandes hachas ovaladas y azadas de las que se utilizan normalmente para limpiar la maleza del campo y cultivar la tierra. Otro producto de los talleres era un tipo de azuela fabricada con la técnica del "tranchet", mediante la cual el lado afilado del útil se obtenía desprendiendo una lasca curvada de su extremo.

Las lascas curvadas que se desprenden después de realizada esta operación, llamadas "mondas de naranja" por su parecido con dicha cáscara, constituyen una parte importante de los residuos abandonados en el lugar donde estuvieron los talleres. En algunos, los depósitos de lascas abandonadas alcanzan una profundidad de 1,5 metros y contienen casi cinco millones de lascas por metro cúbico. Tal cantidad de desechos proporciona los medios adecuados para calcular la tasa de producción. Así, por ejemplo, estudiando una muestra de las "mondas de naranja" mezcladas con otras lascas de piedra, Hester y Shafer han calculado que los talleres de Colhá produjeron un total de más de dos millones de azuelas del tipo "tranchet".

Aun cuando los talleres hubieran funcionado continuamente durante los 650 años de duración del Preclásico Tardío, la producción de azuelas "tranchet" no podría haber sido menor de



5. PIRAMIDE DE "MUNDO PERDIDO" de Tikal, en Guatemala; da una idea de la escala de construcción que eran capaces de alcanzar las sociedades mayas del Preclásico. La pirámide tiene más de treinta metros de altura y hasta hace sólo unos años no había sido excavada. Construida en la segunda mitad del período Preclásico Tardío, está rodeada por otras pequeñas construcciones posteriores que forman un centro ceremonial. Cuando Tikal fue explorada por los arqueólogos creíase que estas estructuras se levantaron hacia el año 700 de nuestra era. La excavación ha mostrado que el conjunto se construyó al menos 400 años antes.

3000 anuales. A esa cantidad hay que añadir un número todavía mayor de hachas ovaladas y otros utensilios que son más difíciles de contar, dado que su manufactura no dejó ningún resto tan singular como las "mondas de naranja". El total de la producción sobrepasa las necesidades de la población local: la verdad es que los productos de Colhá se distribuían en puntos muy alejados. Se han encontrado al norte de Belize y en asentamientos tan distantes como Uaxactún y El Mirador en Guatemala. A pesar de que muchas comunidades mayas tenían talleres para fabricar útiles de chert, las manufacturas estandarizadas de Colhá dominaban la mayor parte del mercado en un radio de 40 kilómetros y se las solicitaba desde enclaves situados más allá de los 160 kilómetros.

Los hallazgos relativos a actividades agrícolas e industriales dan la impresión de que se trataba de una sociedad en los umbrales de la civilización. Y esa impresión adquiere mayor fuerza al considerar los centros ceremoniales construidos durante el Preclásico Tardío. Durante el Preclásico Temprano y Medio, los complejos ceremoniales eran unidades relativamente pequeñas situadas en el centro de las aldeas agrícolas. Durante el Preclásico Tardío se engrandecieron y se levantaron en el centro de las ciudades, prefigurando la organización espacial y demográfica de la sociedad clásica.

El lugar en que tal desarrollo se hace evidente en fecha más temprana es Komchén, al norte de Yucatán; un sitio que E. Wyllys Andrews V, de la Universidad de Tulane, han descrito como una comunidad densamente nucleada y habitada por 3000 o 5000 personas. En el centro de Komchén, cinco grandes plataformas rodean una plaza de unos 80 por 150 metros. Dos de la plataformas son estructuras largas, estrechas y altas, a las que se accede por dos escalinatas; las otras son anchas y más bajas. Una calzada elevada une dos plataformas. Todo el complejo fue erigido en la primera centuria del Preclásico Tardío, entre el 400 y el 300 a. C.

A edida que iba aumentando el impulso social del que son muestra estos monumentos, se construían estructuras que hacían pequeñas a las de Komchén. Nuestra reciente expedición a Nohmul, sufragada por la National Geographic Society, ha descubierto un centro preclásico tardío del siglo tercero después de Cristo. La plaza central, de 130 metros de longitud, estaba flanqueada al este y oeste por montículos grandes y de escasa altura que probablemente servían de base a edificios de madera. En el lado norte estaba la "acrópolis": una plataforma de más de 6000 metros cuadrados, elevada 10 metros sobre el nivel normal del suelo. Esa plataforma, construida totalmente con bloques de piedra caliza extraída a pocos cientos de metros del lugar de la edificación, contenía tanto material de construcción como todo el grupo de montículos de Komchén. El nivel de organización social que era necesario para construir un lugar como Nohmul viene sugerido por el hecho de que al menos 100.000 metros cúbicos de piedra caliza fueron trasladados a la plaza y a las plataformas adyacentes.

Del mismo modo que la organización espacial y la escala de construcción de asentamientos como Komchén y Nohmul nos evocan formas de transición, algunas de las más interesantes edificaciones presagian los diseños clásicos. En la acrópolis de Nohmul encontramos los agujeros de los postes que servían de cimientos a una larga sala rectangular construida con troncos de árboles. Estaba formada, en sentido transversal, por tres pasillos que medían más de siete metros; a lo largo tenía por lo menos ocho agujeros que cubrían más de 23 metros. Una estructura de ese tipo era demasiado grande como para servir de habitación y carece de la planta típica de los templos mayas. La interpretación más plausible es que la larga sala es un antecedente en madera de los "palacios" de piedra del período Clásico. Se sospecha que los palacios, hallados en muchos lugares importantes, habrían servido como residencia de los señores de las ciudades mayas y miembros de su aparato administrativo; estaban formados por varios módulos, a modo de viviendas, construidos de mampostería y tienen un diseño básico no muy diferente de la construcción de la acrópolis.

De manera similar, las pirámides que constituyen un elemento significativo de la arquitectura del período Clásico comenzaron a alcanzar proporciones monumentales durante el Preclásico Tardío. Al noroeste de la acrópolis de Nohmul se ubica una segunda concentración de edificios entre los que hay un templo-pirámide de unos 17 metros de altura que fue construido, según mi opinión, en algún momento del Preclásico Tardío.

Otros lugares preclásicos tienen pirámides mucho mayores. En Lamanai, unos 60 kilómetros al sur de Nohmul, hay una enorme estructura conocida como N10-43. La pirámide, que sobrepasa los 30 metros de altura, está co-

ronada por un grupo de tres pequeños templos: David Pendergast, del Royal Ontario Museum de Toronto, ha demostrado que la edificación entera pertenece al Preclásico Tardío. La famosa pirámide "Mundo Perdido" de Tikal, de tamaño semejante, fue construida por el mismo tiempo, como también lo fue el profundo foso y el murete que rodea el centro de Becán, que tiene una circunferencia de unos 1900 metros y estaba destinado, por lo que se ve, a funciones defensivas. Estas estructuras son tan imponentes que cuando fueron descubiertas se las adscribió de inmediato al momento cumbre del período Clásico; sólo una cuidadosa excavación ha demostrado que se construyeron entre cuatro y ocho siglos antes.

El grado de organización social y económica implícito en obras monumentales como las de Tikal, Lamanai, Nohmul y otros enclaves, es impresionante. Pero lo que la mayoría de la gente asocia con el término civilización no es la movilización organizada de mano de obra, sino los logros culturales e intelectuales de alto nivel. Un lugar que aporta pruebas de ambas formas de avance social es El Mirador, que se levanta al norte de Guatemala, en la frontera entre este último país y México. El Mirador fue descubierto desde el aire por unos europeos en la década de 1920. En 1962 Ian J.A. Graham, de la Universidad de Harvard, exploró el lugar y realizó un mapa del mismo. Por el estilo de las construcciones y la ausencia de monumentos con inscripciones calendáricas, Graham dedujo que El Mirador se levantó antes del comienzo del período Clásico.

Los trabajos realizados recientemente por un equipo de la New World Archaeological Foundation, bajo la dirección de Matheny, han revelado el gran tamaño de El Mirador y han descubierto algunos ejemplos intrigantes de la cultura intelectual del Preclásico. El corazón del lugar es un área de apiñada edificación de un kilómetro por 800 metros de lado. En el centro hay dos pirámides llamadas El Tigre y Monos, que se cuentan entre las mayores estructuras levantadas por los mayas. Construidas hacia el año 150 a. C., cada pirámide contiene más de un cuarto de millón de metros cúbicos de material de obra. El Tigre, con sus 55 metros, pueda parangonarse con un edificio de 18 plantas. Agrupados en su cúspide se encuentran tres templos dispuestos de forma triangular. Esta disposición triangular, que se repite a gran escala por las dos pirámides que flanquean a la de El Tigre, parece ser un



6. HACHA DE PIEDRA encontrada por Dennis E. Puleston en el río Hondo, cerca de San Antonio en la frontera entre Guatemala y México; conserva su mango original de madera de *Annona*. El hacha, ennegrecida por 2000 años de inmersión en el río, pudo haberse empleado para desbrozar y cavar el campo; el examen microscópico revela que ninguna de las marcas que tiene son resultado de talar árboles. La piedra ovalada que forma el hacha mide unos 20 centímetros de largo. (Cada división en la regleta graduada equivale a un centímetro.) El hacha fue fabricada en Colhá, Belize, a unos 40 kilómetros de San Antonio. Durante el Preclásico Tardío Colhá fue un centro manufacturero que producía miles de utensilios de piedra cada año.



7. CANULA DE HUESO con una dibujo grabado que puede simbolizar la autoridad real, encontrada en Cuello, Belize. El hueso procede de un gran mamífero no identificado, quizás un jaguar. Los dibujos grabados representan un *pop*, la estera utilizada por los gobernantes mayas. La cánula, verosímilmente el mango de un instrumento utilizado para realizar sacrificios rituales, se encontró en un depósito poco profundo entre los esqueletos de dos docenas de varones jóvenes. Es posible que éstos hubieran sido sacrificados cuando, hacia el año 400 a. C., se reconstruyó el centro ceremonial de Cuello. La presencia del *pop* sugiere que en los comienzos del período Preclásico Tardío los gobernantes mayas habían impuesto la realeza y los símbolos propios de la autoridad real.

motivo característico de la arquitectura ritual del Preclásico Tardío.

La pirámide que flanquea El Tigre por el lado sur, conocida como Estructura 34, ha sido excavada y el resultado confirma que algunos elementos de la cosmología del período Clásico habían aparecido durante el Preclásico Tardío. En la Estructura 34 el equipo de Matheny encontró máscaras de estuco, cada una de las cuales representaba un jaguar de más de dos metros de altura. Algunas partes de las máscaras son negras y el fondo es de color ocre, pero los dientes y las garras están pintados de rojo.

La combinación del rojo y el negro es una característica del arte maya del Clásico, que se dio ya en el Preclásico Tardío. La dualidad rojo-negro encierra una significación ritual, ya que el rojo se asocia con el Este y el negro con el Oeste; el recorrido diario del Sol desde un punto a otro del horizonte es el eje dominante de la cosmografía maya. En mi opinión, el rojo y el negro obedecen a transformaciones realizadas conscientemente, derivadas de la observación que habían hecho los mayas de cómo la cerámica se pone de color rojo al ser horneada en una atmósfera oxidante, se vuelve negra al ser recalentada en condiciones reductoras y retorna al rojo al reoxidarse. La cerámica del Preclásico Tardío, que tiene frecuentemente áreas bien definidas de rojo y negro, muestra que los alfareros mayas conocían el fenómeno al comenzar la cuarta centuria antes de Cristo.

Dos kilómetros al este de El Tigre se encuentra el mayor conjunto de edificios de El Mirador; constituye, además, posiblemente, el mayor de toda la historia maya. El complejo se conoce con el nombre de Danta. Está formado por dos terrazas, cada una de ellas de más de trescientos metros de anchura, excavadas en la ladera de una colina como dos gigantescos escalones. Por encima mismo de ellas se levanta un templo doble con una altura de 10 pisos. El templo es mucho más alto que la vegetación de bosque tropical circundante y es visible a gran distancia. El aspecto visual de la pirámide está estrechamente relacionado con su significación ritual. Para un observador situado sobre El Tigre, en ciertos años durante el equinoccio de primavera Júpiter, Mercurio, Marte y Saturno parecen surgir de lo alto de la pirámide Danta. Muchos lugares del período Clásico fueron diseñados para aprovechar los fenómenos celestes, y algunos conjuntos construidos casi al final del Preclásico Tardío, en el año 300 d. C., ya mostraban este tipo de organización. El complejo de El Mirador, construido unos 400 años antes, sugiere que los mayas habían logrado un considerable conocimiento del cielo mucho antes del comienzo del período Clásico.

Los conocimientos iconográficos y astronómicos que revela El Mirador no constituyen un caso aislado. Artefactos procedentes de diversos lugares muestran que la mayoría de los elementos que componían la cultura intelectual típica del período Clásico se habían comenzado a articular y a relacionar entre sí durante el Preclásico Tardío. Entre los elementos centrales de ese conjunto cultural estaban la escritura y el sistema de numeración. Las funciones más importantes que ambos logros tenían eran las de representar a los dioses y mostrar cómo la relación entre los dioses y los hombres sustentaba la sucesión de los señores de la comunidad maya. Tales funciones pueden observarse con bastante claridad en los objetos del Preclásico Tardío.

El panteón compartido del Preclásico Tardío se puede conocer a partir de los hallazgos de Cerros y Nohmul. Una ofrenda encontrada en la cima de la estructura 6B de Cerros (un templo-pirámide) incluía cuatro cabezas de jade con tres tipos faciales diferentes. En Nohmul, a 28 kilómetros de Cerros, se encontró una ofrenda idéntica en la base de un pequeño templo. Además, algunos ejemplares de al menos dos de los tipos de cabezas han sido hallados en diversos lugares esparcidos por la península de Yucatán, lo que sugiere que toda la población de las tierras bajas del norte comprendía y tenía como propia la iconografía esculpida sobre las cabezas de piedra. ¿Qué podría representar esa iconografía?

Yo interpreto las cuatro cabezas como representaciones de tres deidades mayas. Además, creo que se trata de los mismos dioses esculpidos sobre la orejera de jade de Pomona. Las orejeras de jade eran ornamentos de forma circular y abocinada que utilizaban los mayas de rango elevado. En 1949 se descubrió en una tumba de Pomona, un pequeño enclave de la costa de Belize, una orejera de notable ta-

maño y especial belleza. Después de examinar la cerámica encontrada en la misma tumba y las notas de los primeros investigadores que estudiaron la pieza, he podido asignar a la orejera una fecha situada en la segunda mitad del Preclásico Tardío, quizás el año 100 d. C. La orejera es una bella pieza de joyería, pero su interés fundamental estriba en las cuatro cabezas de perfil y en los signos grabados alrededor de su circunferencia.

Dos de las cabezas representan a Kinich Ahau, el dios solar, que se identifica por el glifo empleado para el término maya *kin* grabado sobre su mejilla. El tercer perfil corresponde al del dios del maíz; el cuarto es una deidad de grandes labios con el signo *akbal*, la oscuridad, sobre la mejilla. El dios del maíz y el dios solar, situado en el lado opuesto al primero, están identificados con los números 8 y 4 respectivamente; números de los que son tutelares. Los otros signos asociados a las cabezas han sido descifrados por John S. Justeson, del Vassar College, y Will Norman, de Tulane, como expresión, en una antigua versión del dialecto maya-yucateco, de la interacción entre los dioses y la entronización de un gobernante. Justeson y Norman piensan que se puede tratar de la entronización de un antiguo señor de Yaxchilán, importante ciudad maya situada en la orilla del río Usumacinta, lejos de Pomona.

Los signos grabados en el jade de Pomona permiten avanzar algunas conclusiones. En primer lugar, los números asociados con dos de los perfiles muestran que el sistema de numeración maya se había desarrollado hacia el año 100 d. C. (En el sistema maya el número 1 está representado por un punto y el 5 por una barra. Unos signos adicionales, que indican posición, permiten representar grandes números a partir de esos pocos elementos.) Nosotros encontramos un ejemplo del mismo sistema de barras y puntos en Cuello. Una tumba situada en el interior de una pirámide guardaba diversos sellos de aproximadamente la misma antigüedad que el jade de Pomona. Uno de los sellos tenía el número 9: una barra y cuatro puntos. Ese hallazgo refuerza la hipótesis según la cual la numeración formaba parte del emergente complejo intelectual del Preclásico Tardío.

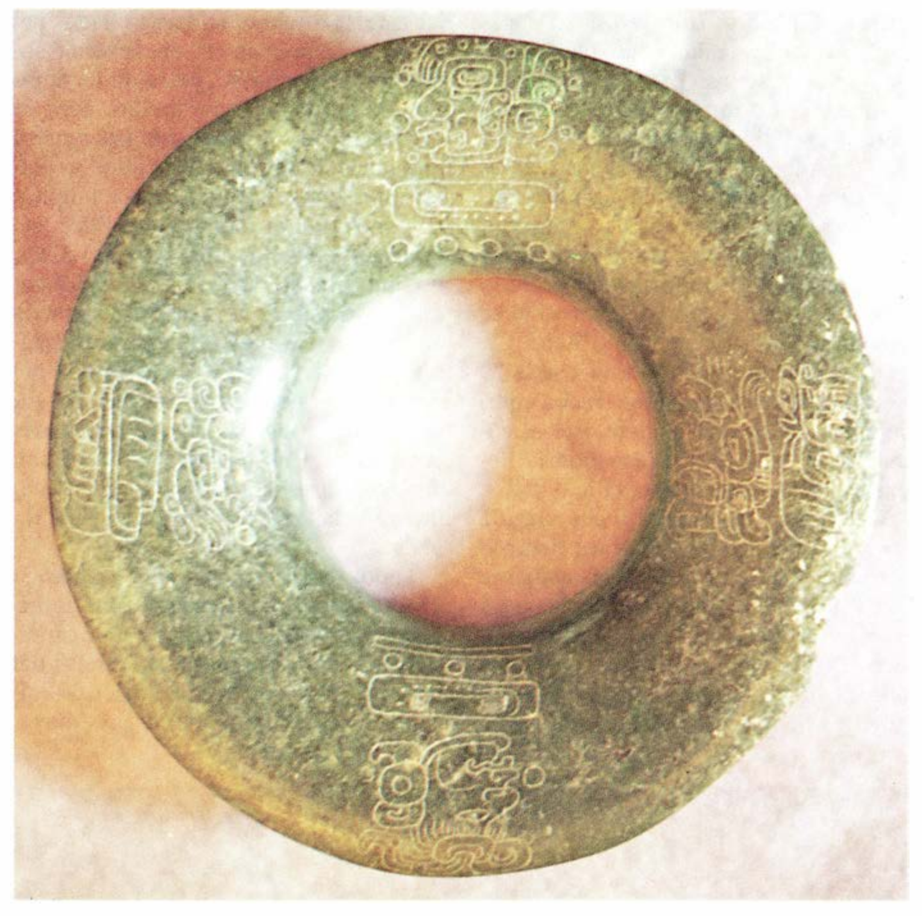
Aún más significativa es quizá la conjunción de signos que representan dioses, gobernantes y números. Una de las características distintivas de la civilización del Clásico maya es el registro de las fechas del reinado de los gobernantes. Las fechas, junto con el retrato del señor, se registraban generalmente sobre pilares de piedra denominados estelas. Estas servían para conmemorar a la persona real y racionalizar su reinado conectándolo con los dioses. Además, en algunos casos el señor era representado con aspecto divino. Las estelas con fechas e inscripciones se han tenido como una de las características definitorias del período Clásico. Hasta hace una generación se databa su aparición en el año 300 d. C., pero el descubrimiento de la Estela 29 de Tikal, que contiene una fecha equivalente al año 292, sugiere que el comienzo formal del Clásico podría llevarse posiblemente hasta el año 250.

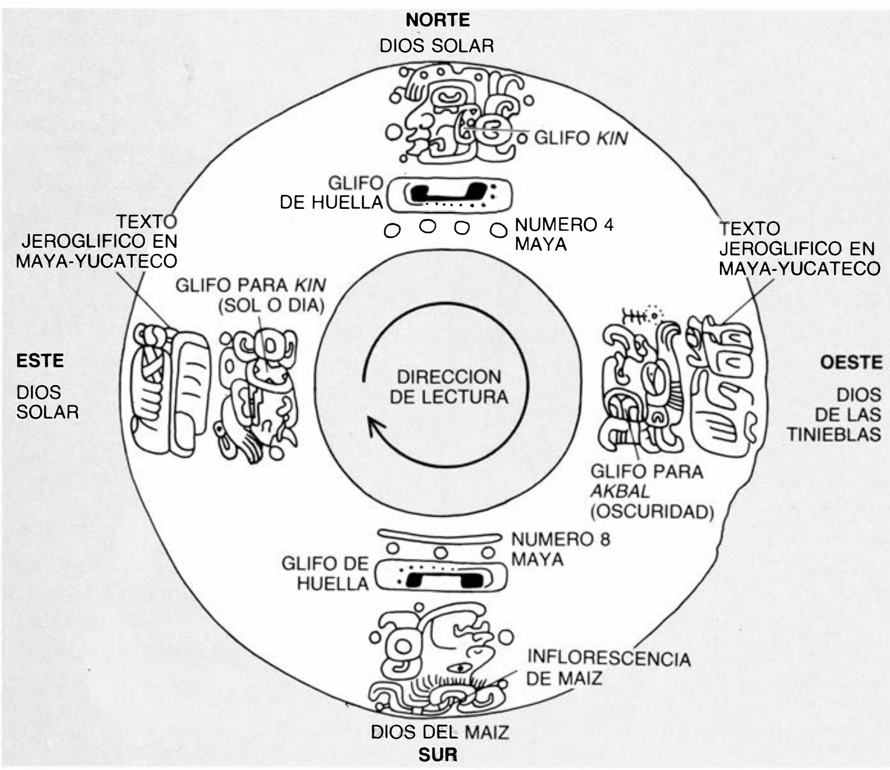
Cualquiera que sea la fecha elegida para el comienzo formal de los tiempos clásicos, resulta cada vez más evidente que muchos elementos del "culto a las estelas" aparecieron durante el Preclásico Tardío. En Cuello encontramos una estela plana de sólo unos 80 centímetros de altura, bastante menos que las estelas totalmente desarrolladas del Clásico. La pequeña estela apareció sobre la Plataforma 34, enfrente de la pirámide del Preclásico Tardío, pero la excavación de la plataforma demostró que la estela fue erigida cuando la plataforma tenía un suelo más antiguo. Creemos que el monumento lítico fue realizado entre los años 50 y 100 d. C., o como mucho 200 años antes del comienzo del período Clásico. La estela de Cuello carece de relieves, pero también se han hallado monumentos del Preclásico Tardío con retratos de gobernantes e incluso con inscripciones jeroglíficas. Entre ellos se encuentran algunas piezas de El Mirador y una piedra tallada de San Diego, en Guatemala.

Todos estos objetos del Preclásico Tardío deben considerarse de transición, dado que carecen de una característica fundamental de las estelas del período Clásico: fechas inscritas siguiendo el sistema calendárico maya.



8. SELLOS GRABADOS encontrados en Cuello; muestran que durante el Preclásico Tardío los mayas disponían ya de un sistema de numeración. Los sellos pueden haber sido empleados para indicar la propiedad de pieles o tejidos. El sello de la parte inferior de la ilustración tiene grabado el número 9 según el sistema maya de numeración: una barra y cuatro puntos. (Se emplea una barra para el número 5 y un punto para el 1. La barra que señala la cifra es la línea situada a la derecha de los puntos; la línea de la izquierda forma parte del dibujo realizado alrededor del número.) Los sellos se hallaron en una tumba de la pirámide de Cuello, construida hacia el año 100 d. C.; se conocen inscripciones, anteriores a esa fecha, de barras y puntos.





9. OREJERA DE JADE encontrada en 1949 en el Rancho Pomona, en Belize, que contiene ejemplos de escritura maya preclásica. El arete, de 18 centímetros de diámetro, es un adorno para la oreja concebido para ser llevado sobre un tocado. Como sugieren los glifos situados al pie de los grabados, los símbolos deben ser leídos en el sentido de las agujas del reloj. Comenzando por la izquierda se ve lo siguiente: el dios solar junto a una inscripción en dialecto maya-yucateco; otra representación del dios solar, tutelar del número 4; un dios de los tinieblas y el dios del maíz, tutelar del número 8, de cuya cabeza brota una planta de maíz. La semejanza que existe entre las representaciones de los dioses de la orejera y las cabezas halladas en Cerros y Nohmul, reproducidas en la figura 1, deja ver en qué medida se encontraba unificada la cultura maya en el Preclásico Tardío. John S. Justeson, del Vassar College, y Will Norman, de la Universidad de Tulane, interpretaron los jeroglíficos como pertenecientes al dialecto yucateco. (El dibujo es de Alan D. Iselin.)

Pero incluso ese detalle final ha sido reemplazado en unos cuantos objetos de piedra anteriores a los tiempos clásicos. Una estela robada de su lugar original, que se encuentra actualmente en Seattle, porta inscrita una fecha jeroglífica equivalente al año 199 d. C. Pero el monumento con inscripción calendárica más antiguo de las tierras bajas mayas es el fragmento de un altar de Polol, en Guatemala. En el fragmento aparecen dos figuras ricamente vestidas flanqueando una columna de números. En la cúspide de la columna aparece un signo que se conoce como Glifo Introductorio de la Serie Inicial, que anuncia una fecha calendárica. Desgraciadamente la piedra está demasiado erosionada como para poder reconocer la fecha, pero John A. Graham, de la Universidad de California en Berkeley, cree que cae dentro del Ciclo 7 del tiempo maya que acabó el año 41 d. C. La fecha correcta podría ser considerablemente más antigua, ya que Graham ve un estrecho parecido entre el altar y dos estelas de Abaj Takalik, yacimiento que él investigó en la costa del Pacífico de Guatemala. Aunque la fecha más tardía posible de los monumentos de Abaj Takalik no es posterior al año 100 d. C., la más temprana está próxima al 300 a. C.

El desarrollo de las inscripciones calendáricas fue sólo la última etapa de un largo proceso de desarrollo cultural que aconteció durante el Preclásico Tardío. Cuando el proceso culminó, los mayas habían acumulado la mayor parte de los elementos de la civilización clásica. Se habían desarrollado diferentes representaciones de dioses y gobernantes; esas representaciones iban acompañadas tanto de escritura como de numeración. La elaboración de una cultura intelectual compartida por todos los grupos mayas descansaba sobre una serie de innovaciones sociales y económicas que recogían los adelantos conseguidos a lo largo de los períodos Preclásicos Medio y Tardío. Una de las preguntas más importantes que queda por contestar es por qué el proceso de desarrollo social se aceleró de forma tan sorprendente justo antes del comienzo del período Preclásico Tardío. Quizás en la próxima década se encuentre respuesta a esta pregunta y a otras muchas. Pero, por muy sorprendentes que puedan ser los hallazgos de los años venideros, ninguno podrá compararse con los de la década pasada que han transformado radicalmente nuestra visión del nacimiento de la civilización maya.

Juegos de ordenador

Prestidigitación digital: exquisito arte de la magia y la ilusión

A. K. Dewdney

Reunamos en una misma frase las palabras "magia" y "ordenador" y probablemente provocaremos en cualquier persona racional un estado de disonancia cognitiva ¿De qué modo podría lo mágico, esencia de un mundo tenebroso, al parecer desvinculado de las reglas de la lógica, invadir el mundo del ordenador, expresión primaria de nuestra racionalidad? La disonancia proviene de la palabra "magia" tenida por símbolo de lo preternatural. En realidad, la magia es parte del mundo natural y, los magos, personas lógicas y racionales.

Tres son los elementos suficientes, si no siempre necesarios, para lograr la manifestación del acto mágico: público, recursos y presentación. He visto hacer magia sin recursos ni apoyaturas; nunca sin público. Cualquier público puede servir; queda a cargo del aspirante a mago la tarea de engatusarlo. Bien considerado, un ordenador podría ser ayudante muy despierto; supondré, pues, que el mago informático será capaz de materializar al menos un microordenador. Una sencilla programación capacitará a la máquina para adivinar un naipe sacado al azar, para embarcarse en proezas de clarividencia numérica y para determinar telepáticamente la identidad de una carta de la baraja. En realidad, bastaría una calculadora de bolsillo para iniciarnos en el negocio de la lectura del pensamiento.

Dejemos aquí a público y recursos. El resto es presentación. La presentación convierte la lógica interna de todos los trucos en un fenómeno desconcertante. La verdadera magia tan sólo se enseñorea del escenario durante el tiempo que el mago logre mantener y manipular determinadas convicciones en la mente de su auditorio. Cada una de estas convicciones parece conducir inexorablemente a la siguiente, y así, hasta un desenlace asombroso o desconcertante. En ocasiones, antes de iniciar el truco puede sernos de ayuda algún conjuro; la informática dispone sobradamente de jerigonza para tales propósitos. Se aconseja utilizarla liberalmente con profanos y juiciosamente con iniciados. He aquí cómo podríamos presentar la primera de nuestras hazañas compumágicas.

"Señoras y caballeros: forzosamente tenía que suceder, sólo era cuestión de tiempo. Grandes progresos, muy recientes, en inteligencia artificial, han capacitado a los ordenadores para leer la mente humana. La teoría del indeterminismo recursivo garantiza que de los bucles iterativos infinitos acabará por surgir un cierto algoritmo no polinómico, que el célebre profesor tibetano de teoría de computabilidad, Dr. Yan Kee, ha sido el primero en describir. El programa recorre cíclicamente, una y otra vez, una estructura de datos estocástica semi-infinita, va extrayendo de ella las primitivas lógicas, y va compilándolas a instancias de la base de datos... [Podemos seguir parloteando en esta vena durante cierto tiempo]. Por favor, ¿querría acercarse un voluntario del público?

Una vez presentado al público el infeliz voluntario, se le pide que saque al azar un naipe, de una baraja al efecto. Cualquier carta servirá. El mago sostiene en alto el naipe, para que todos lo vean. Supongamos que sea el seis de tréboles. Este es un buen momento para tomarle más todavía el pelo al voluntario. El mago dice: "Por favor, oprima el naipe contra su frente y concéntrese al máximo. Su mente, y la mente preprogramada del ordenador, han de alcanzar un estado de simulada simultaneidad."

El mago se dirige entonces al teclado del ordenador y pone en marcha el programa. Inmediatamente aparece un mensaje en la pantalla. El mago lee en voz alta el siguiente diálogo, a beneficio del público:

"¿ESTÁ CONCENTRADO EL SUJETO?" (el ordenador "habla" en mayúsculas.) "Sí". (El mago teclea la respuesta.)

"¿ES NEGRA LA CARTA?" "Sí"
"¿ES DE TRÉBOLES?" "Sí"
"¿ES UN 8 O MENOS?" "Sí"
"¿ES UN 5 O MAS?" "Sí"
"¿ES UN 5 O UN 6?" "Sí"
"¿ES UN 6?" "Sí"

Una y otra vez, y tras formular varias preguntas, el programa acaba por hacer diana en la carta seleccionada. Sorprendentemente, la respuesta a todas las preguntas siempre es "Sí", como si todo cuanto el programa quisiera fuese confirmación. Es muy posible que los lectores se pregunten en cómo se consigue tal truco. De ordinario, yo me lo pensaría antes de satisfacer tal curiosidad: entre los ilusionistas rige un código no escrito que prohíbe explicar las mañas en que se basan sus números. Para tener la magia como medio de vida, el ilusionista ha de ser capaz de crear y mantener un aire de misterio impenetrable, por ello, no puedo revelar el fundamento de todos los trucos que presentamos aquí. Sin embargo, en lo tocante a este sagaz truco de cartas, tengo autorización para hacerlo público de la persona que me lo comunicó, Christopher Morgan, quien fuera en tiempos ilusionista profesional. En la actualidad, Morgan es uno de los directivos de la Lotus Development Corporation, de Cambridge, Massachusetts; presumiblemente, su sustento ya no dependa tanto de los trucos de magia.

En cuanto el voluntario extrae la carta del mazo, el mago la anota cuidadosamente. Tras un floreo, avanza con paso decidido hacia el teclado y escribe "Sí" en respuesta a cada pregunta. Cada "Sí", sin embargo, puede estar acompañado, o no, de una inocente pulsación de la barra espaciadora. La pulsación, o no, de la espaciadora, no se hace respondiendo a la cuestión precedente, lo que hace, en realidad, es determinar el contenido de la pregunta siguiente. Así, cuando el fabuloso programa del profesor Yan Kee pregunta, ¿ESTÁ CONCENTRADO EL SUJETO?, el mago pulsa las teclas "s i espaciadora" solamente si la carta seleccionada es negra. Si la carta fuese roja, el mago únicamente pulsaría "s i". El programa sabe entonces lo suficiente para hacer la pregunta oportuna en el paso siguiente. Si el mago pulsó la espaciadora, el programa pregunta "¿ES NEGRA LA CARTA?", en caso contrario pregunta "¿ES ROJA LA CARTA?"

De este modo, el mago va guiando el descenso del programa por las ramas de un árbol binario implícito, es decir, de la armazón lógica subyacente, encargada de guiar todas las elecciones necesarias para identificar individualmente a cada una de las cartas del mazo [*véase la figura 1*]. Por ejemplo, una vez determinado el color de la carta seleccionada, la elección siguiente ha de establecer su palo. En cuanto el ordenador "se entera" de que la carta es ne-

gra, el mago puede secretamente informarle de si se trata de picas o de tréboles. Si la carta fuera roja, el paso siguiente consistiría en distinguir corazones de diamantes. Todas las demás elecciones tienen por fin determinar el valor del naipe, desde as, 2, 3,... hasta sota, reina y rey. Dado que en la baraja francesa hay 13 valores, se requieren cuatro preguntas para distinguir unos de otros.

Es fundamental que el mago distraiga la atención del público cada vez que haya de tocar la barra espaciadora. La forma más sencilla se basa en la tecla de "retorno del carro" (que en muchos ordenadores lleva la inscripción "return" o "enter"). Siendo preciso pulsar esa tecla cada vez que el mago teclea su respuesta, se puede hacer un amplio gesto ceremonioso con la mano derecha, mientras la izquierda, disimuladamente, pulsa el espaciador. La práctica da la perfección.

El programador que he llamado YAN KEE es más bien largo, pero muy fácil de preparar. Está dividido en 31 pequeñas secciones, que corresponden al número total de distintas cuestiones que ha de poder preguntar. Todas las secciones tienen la misma estructura algorítmica fundamental.

```
xx dar salida a "¿ES NEGRA LA
   CARTA?"
   admisión de caracteres
   cómputo del número de caracteres
   si número de caracteres = 3
      dirigirse a YY
      si no, ir a ZZ
```

En este algoritmo, XX denota el número de línea o la etiqueta a la cual se ha transferido el control del programa tras la pulsación de las teclas "s i espaciadora" de la primera pregunta de mi ejemplo. Tras imprimir en esta sección la pregunta apropiada, el programa acepta los caracteres que le suministra el mago desde la consola y, sin más, los cuenta. Si se han tecleado tres caracteres, es que el mago ha debido pulsar la barra espaciadora.

En tal caso, la ejecución continúa a partir de la sección rotulada YY, que comienza con la pregunta "¿ES DE TRÉBOLES?" Si, por el contrario, el mago no ha pulsado la barra espaciadora, el programa toma la rama conducente a la sección etiquetada ZZ, que comienza con la pregunta "¿ES DE PICAS?" Todo aspirante a mago tiene que aprenderse de memoria el proceso de decisión inherente a la pulsación o no de la barra espaciadora en cada nivel de interrogación.

La siguiente hazaña de prestidigitación programada es la propuesta por Michael Rohregger, un lector de Linz, Austria. El mago informático, tras apelar a las mismas y cuestionables teorías antes expuestas, lanza ahora la afirmación de que un segundo programa es capaz de adivinar los pensamientos de una persona ¡incluso antes de que los discurra! Desdichadamente, prosigue diciendo el mago, este campo de la parapsicología informática todavía no ha alcanzado un desarrollo completo, por lo que el programa tan sólo tiene éxito la mayoría de las veces, pero no siempre. Se solicita un voluntario de entre el público, al que se hace tomar asiento, y se le pide que elija entre dos bits, o sea dos números, 0 y 1. Para evitar que el voluntario se distraiga con la pantalla del monitor, puede que lo mejor sea que voluntario y monitor den cara al público.

El voluntario dice en voz alta el número que ha pensado, y el mago y el público lo comparan con un digito ya presentado en la pantalla del monitor. Si los dígitos son iguales, el mago afirma prudentemente con la cabeza. Si son diferentes, el mago explica que puede hacer falta algún tiempo para que el programa sintonice con los procesos mentales del voluntario. (Más todavía, siempre es posible culpar al voluntario de "provocar interferencias estadísticas"). El mago pulsa una tecla y el programa predice el próximo de los números que va a pensar el voluntario. Se le pide otra vez al voluntario que elija.

El experimento se repite cuantas veces sea necesario para lograr que el "programa se sincronice lo más plenamente posible con el sistema de referencia espacio-temporal de la actividad mental del sujeto". Cada vez que el voluntario dice un número, el mago mueve afirmativamente la cabeza y sonríe si la máquina lo acierta, frunciendo el ceño pacientemente, en cambio, si se produce un fallo.

Al principio el programa no parece puntuar más de lo que se lograría por puro azar, acierta alrededor del 50 por ciento de las veces. Sin embargo, cuanto más se repite el experimento, se observa una marcada mejoría: el programa tiende a puntuar por encima del 60 por ciento, y en ciertos casos, considerablemente mejor. He aquí cómo funciona.

El programa, que llamaremos PREDICTABIT, se encarga de mantener actualizada una tabla de 16 × 2, llamada *sujeto*. Cada una de las 16 filas tiene como índice una de las 16 posibles secuencias de cuatro bits consecutivos. Las columnas de la matriz representan

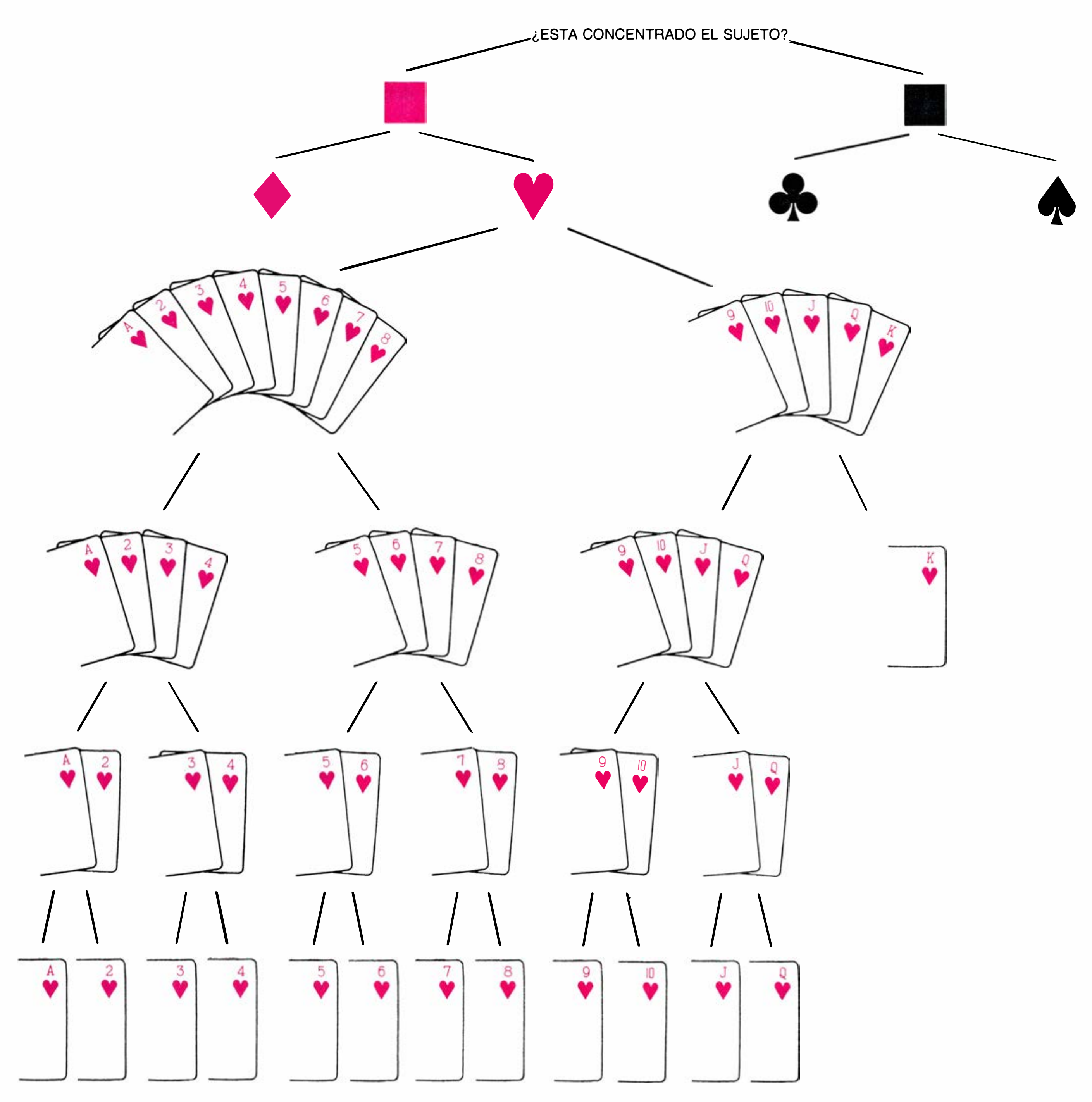
las dos posibles elecciones de bits, 0 y 1. El primer elemento de cada columna es el número de veces que el sujeto ha elegido un 0 inmediatamente después de elegir la secuencia de bits correspondiente al índice de fila. El segundo elemento expresa el número de veces en que el voluntario, tras esa secuencia, ha elegido un 1.

Por ejemplo, supongamos que el sujeto haya elegido los bits 0,1,1,1 en los cuatro intentos precedentes. El programa trata esos cuatro bits como un único número binario y los convierte en su equivalente denario, en este caso, 7. Supongamos que en la tabla anterior, *sujeto*(7,0) sea igual a 4 y *sujeto*(7,1) sea igual a 2. Ello significa que en anteriores ocasiones, tras la secuencia 0, 1,1,1, ha elegido el 0 cuatro veces y, solamente dos, un 1. En vista de tal comportamiento pasado, el programa predice que la próxima elección del voluntario será un 0.

Probablemente, el lector estará viendo con toda claridad el programa implícito en esta descripción. En su forma más sencilla, PREDICTABIT va recorriendo un ciclo de seis secciones simples:

Introducción del último bit elegido
Actualizar la tabla, conservando el índice inicial de secuencias
Desplazamiento de variables
Formación de un nuevo índice de secuencias
Comparar los elementos de la tabla *sujeto*
Hacer la predicción

En cuanto el voluntario dice en voz alta un dígito binario, el mago lo introduce en el ordenador. Cuatro variables, llamadas *primera, segunda, tercera* y *cuarta* recogen las cuatro últimas elec-



1. Porción del árbol secreto de decisión en que se funda el truco de adivinación computarizada de Christopher Morgan

ciones que ha efectuado el voluntario. Una variable, llamada *índice*, almacena el número de fila, computado a partir de los valores que en ese momento tengan las variables *primera* a *cuarta*. Si el último de los bits mencionados es 0, el programa incrementa en 1 el elemento *sujeto*(*índice*,0). En caso contrario, incrementa en 1 el elemento *sujeto*(*índice*,1).

A continuación, la tercera sección del programa desplaza los contenidos de las cuatro variables, como se indica seguidamente:

cuarta ← último bit (entrada)
tercera ← *cuarta*
segunda ← *tercera*
primera ← *segunda*

PREDICTABIT construye el nuevo número índice de la secuencia calculando una suma de productos: $1 \times primera + 2 \times segunda + 4 \times tercera + 8 \times cuarta$. A continuación, el programa compara el elemento *sujeto*(*índice*,0) con *sujeto*(*índice*,1), para el valor recién calculado de *índice*. Si *sujeto*(*índice*,0) fuese mayor que *sujeto*(*índice*,1), la predicción que PREDICTABIT presenta en la pantalla será 0. En caso contrario, presenta un 1. Para funcionar correctamente, el programa tiene que predecir también las cuatro primeras cifras que pensará el voluntario, lo que se consigue proporcionando a las cuatro primeras variables valores imaginarios, que pueden, perfectamente, ser todos ellos ceros.

En el caso de que el mago quiera hacer saber también el porcentaje de éxitos de PREDICTABIT, vale la pena añadir al programa una sección más. Declaremos una variable, llamada *tanteo*, e insertemos, justamente antes de la sección de desplazamiento de las variables, las instrucciones adicionales precisas para comparar *cuarta* con el último bit anunciado por el voluntario. Si son iguales, se incrementa en 1 *tanteo*. Al terminar la exhibición, el programa divide *tanteo* entre el número de pruebas, multiplica el cociente por 100 y presenta el resultado.

El truco funciona porque las personas tendemos, sin darnos cuenta, a adoptar reglas cuando tenemos que ir seleccionando al azar una de dos opciones. Por ejemplo, después de elegir 0 dos veces seguidas, resulta tentador tomar el tercer dígito igual a 1. Tratando de luchar contra esa tendencia, muchos pueden añadir un tercer 0, pero entonces la tentación de hacer que la cifra siguiente sea un 1 es todavía mayor. La probabilidad de que el dígito siguiente sea un 1 va aumentando cada vez que se añade un 0 a la secuencia. Evidentemente, si la elección fuera pura y estrictamente aleatoria, los valores anteriormente elegidos no tendrían la menor importancia sobre la elección de cada uno de los sucesivos dígitos: la probabilidad de que el dígito siguiente sea un 1 es siempre la misma, a saber, 0,5.

Tal vez intervengan elementos más sutiles aún cuando las personas intentan elegir un dígito al azar. No obstante, si tales elementos tuvieran algún tipo de dependencia con el historial de elecciones recientes, PREDICTABIT debería salir airoso. Incidentalmente, he encontrado que, para el buen funcionamiento del programa, resulta crucial huir de individuos que tiendan a pensar creativamente. Tales personas tienden conscientemente a adoptar reglas de elección, y a cambiarlas después a mitad de la exhibición, con resultados desastrosos. Para evitar que el voluntario resulte demasiado impredecible, puede ser conveniente añadir algo de cháchara tendente a distraerlo, del siguiente jaez: "Cuando pulse esta tecla, el programa predecirá el número que va usted a pensar a continuación. Es crucial que usted no piense todavía en el número, de lo contrario, la máquina podría aprovecharse y leer directamente en su pensamiento." A partir de ese momento, el mago debe continuamente advertir al voluntario que debe esperar hasta que se pulse la tecla. Recuérdese que la tecla pulsada ha de ser la elección del voluntario en la ronda precedente.

En la siguiente hazaña de magia, el ordenador es al mismo tiempo ayudante y mago. El mago (humano) le pasa al voluntario un mazo de naipes corrientes y le salmodia: "Por favor, tome asiento ante la encarnación informática de un gran mago que ya no se cuenta entre nosotros." Para mejor embaucar al voluntario, se pueden esbozar analogías entre el alma y el *software*. En caso necesario, puede proseguirse con las teorías del profesor Yan Kee.

Finalmente, el mago solicita del voluntario que pulse la barra espaciadora. Emergen entonces directamente del Más Allá las siguientes instrucciones. Obedecida una instrucción, la pulsación de la barra espaciadora hará aparecer la siguiente:

BARAJE CONCIENZUDAMENTE LOS NAIPES, FORME CON ELLOS UN MAZO Y COLÓQUELOS CARA ABAJO SOBRE LA MESA [barra espaciadora].

CORTE EL MAZO HACIA LA MITAD, ANOTE LA CARTA VISIBLE Y RECOMPONGA EL MAZO [barra espaciadora].

DÉ LAS CARTAS CARA ABAJO, FORMANDO SEIS MANOS MÁS PEQUEÑAS [barra espaciadora].
DEDIQUE UN MOMENTO A REVISAR CADA PILA HASTA DAR CON LA QUE CONTIENE LA CARTA CORTADA [barra espaciadora].

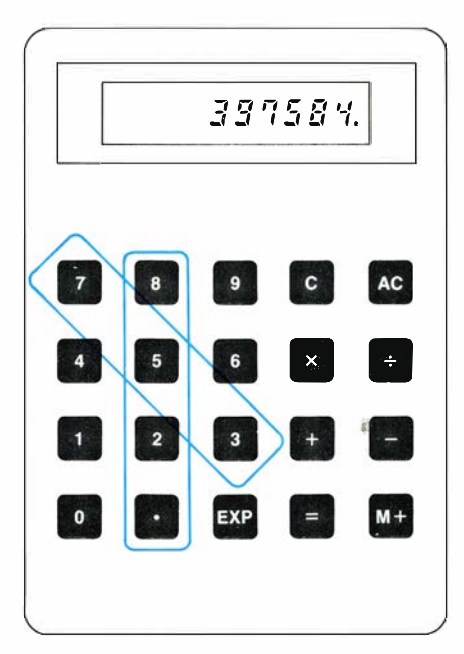
VAYA DANDO AHORA LAS CARTAS DE LA PILA QUE CONTIENE LA CORTADA. DÉLAS DE UNA EN UNA, BOCA ARRIBA, FIJÁNDOSE BIEN. PULSE LA BARRA ESPACIADORA CUANDO ESTÉ LISTO PARA QUE YO DECIDA SI FUE LA CARTA ELEGIDA POR USTED [barra espaciadora].

Conforme el voluntario va dando las cartas de una en una, el programa va reflejando la decisión del fallecido mago. "NO", es su primera respuesta. Un golpecito en la barra espaciadora informa al espíritu del mago que acaba de darse otra carta. "NO", nuevamente. Al cabo de unas pocas cartas más, el espíritu súbitamente exclama (por así decirlo): "¡ALTO, AQUÍ LA TENEMOS!"

El tercero de los programas de esta serie es el más simple. Lo llamaré HOUDINI, por razones que confío serán obvias. HOUDINI se limita a exhibir las instrucciones anteriores, de una en una, hasta que el voluntario comienza a dar las cartas de la pila que contiene la elegida. El programa canta "¡ALTO!" al darse el cuarto naipe. Esa carta o la siguiente serán siempre la carta elegida.

Tan sencillo es HOUDINI que apenas si necesita descripción alguna. Sin embargo, al hacerlo funcionar, el mago humano, temporalmente desocupado, debería mariposear en torno al voluntario, compartiendo el creciente asombro general y asegurándose de que todo vaya bien. El corte, por ejemplo, tiene que hacerse cerca del centro del mazo, unas pocas cartas arriba o abajo. También es preciso mantener el orden de las cartas en las seis pilas mientras se las va revisando. Finalmente, el mago humano tiene que interpretar el significado de la orden de ALTO. En el caso de que la cuarta sea la buscada, es que el alma silícea de la máquina ha leído la mente del voluntario. Si la carta mágica es la quinta, sin embargo, el mago aconseja al voluntario que la vuelva y muestre.
"¡LISP redivivo!", exclama el mago, "¡Cómo no he caído en la cuenta! El gran Houdini ha leído las cartas por clarividencia directa!"

Cumpliendo mi promesa de no revelar el fundamento de todos los trucos



2. Producto mágico de dos números "colineales"

aquí presentados, dejo al cuidado del lector la explicación de este último. Revelaremos la solución el mes que viene, por lo que ruego no me envíen los frutos de sus pensamientos, pues llegarían demasiado tarde. He de agradecer este truco a Harry Lorayne, un ilusionista de Nueva York y experto en recordación. HOUDINI es adaptación al ordenador del conocido truco "Stop!", de Lorayne.

El último truco de lectura del pensamiento me llega a través de Martin Gardner, y tan sólo requiere una humilde calculadora de bolsillo. El mago llama a un voluntario del público. Tras darle la calculadora, el mago se aparta, se toca la frente y fragua alguna invención relativa al establecimiento de una comunión electrónica con los circuitos de la calculadora. Finalmente, le explica al voluntario el siguiente modo de proceder:

"Elija en la sección numérica del teclado cualquier fila, columna o diagonal principal. Me refiero, concretamente al cuadrado que forman las cifras del 1 al 9. Vaya pulsando los números de la línea elegida, en el orden que usted prefiera. Ahora debe tener en la pantalla un número de tres cifras. Pulse la tecla de multiplicar y elija otra línea cualquiera, es decir, una fila, columna, o diagonal principal del cuadrado de números. ¿Lo hizo ya? ¡Estupendo! Vuelva a pulsar esas cifras, en el orden que prefiera. Ahora deberá tener en la pantalla otro número de tres cifras. Cuando pulse el signo igual, aparecerá en la pantalla el producto de los dos números de tres cifras. ¿Lo tiene ya? Ese número es un número mágico. Elija en él cualquier cifra que no sea un cero, sin decirme cuál es. Dígame, en cambio, cuáles son las demás; el orden no importa. Lo único que pretendo es que las haga desaparecer de su mente, para que pueda usted concentrarse de verdad en la que no me dijo. Muy bien. Concéntrese ahora en esa cifra absolutamente importante y con un poco de suerte seré capaz de decírsela."

Los lectores disponen igualmente de un mes para averiguar cómo descubre el mago el número que falta. Fíjense bien en la figura 2. Tendré mucho gusto en describir, en una próxima sección, las venturas y desventuras de los lectores que hayan intentado llevar a la práctica los programas aquí descritos.

NEOÁRBOL, un programa que remeda la extinción de apellidos familiares, picó la curiosidad de más lectores que PALEOÁRBOL, programa que remeda la evolución de géneros y especies. Ambos programas fueron descritos en el artículo del número de julio.

Muchos lectores se contentaron con seguir la evolución de un único género sin ordenador, meramente a base de lanzar un par de dados. Un total de 2, 3 o 4 determinaba la extinción de la especie, un 9 o un 10, el nacimiento de una nueva; los demás resultados no provocaban cambios. Las probabilidades correspondientes a estos tres acontecimientos eran, respectivamente, de 6/36, 7/36 y 23/36. Había yo observado en mis propios experimentos que los árboles ramificados que van describiendo el proceso evolutivo solían morir. ¿Cuántos de los supervivientes –me preguntaba– llegarían a vivir eternamente? Jack Good, del Instituto Politécnico de Virginia y la Universidad estatal de Blacksburg, señaló que la probabilidad de que un tal árbol sea finito es la única de las raíces del polinomio $1/36(6 + 23x + 7x^2)$ que se encuentra comprendida entre 0 y 1l, a saber, la raíz 6/7. Por consiguiente, una séptima parte de mis árboles están destinados a la inmortalidad. Robert M. Solovay, de la Universidad de California en Berkeley, llegó a la misma conclusión por un razonamiento elemental. Mientras tanto, en Park Ridge, Illinois, Edgar F. Coudal hacía funcionar repetidamente el programa necesario para describir la evolución completa de un árbol. Convencido de que todos los árboles estaban condenados a ser finitos, Coudal comenzó a generarlos una tarde, con la intención de determinar su tamaño medio. Según me escribe, de vez en cuando un árbol llegaba a cubrir totalmente la pantalla, una condición de desbordamiento, inserta en el programa, detenía en tal caso la ejecución de esa pasada. No sospechando que el culpable del desbordamiento fuera el carácter infinito del árbol, dirigió sus pensamientos hacia las consecuencas que para la paleontología teórica podrían tener las limitaciones de la pantalla. "¿No le interesaría a [David M.] Raup [de la Universidad de Chicago] averiguar si... los ciclos de némesis [biológica] no son en realidad más que errores fortuitos de desbordamiento de la CPU eterna?"

Los lectores que probaron mano con NEOÁRBOL informaron de los mismos resultados en los experimentos realizados sobre 1000 apellidos. Dadas las reglas típicas de nacimiento de hijos varones, el número de apellidos había disminuido en tres cuartas partes apenas rebasadas 20 generaciones. Por ejemplo, James W. Cox, de Ottawa, Ontario, encontró que la mitad de los apellidos desaparecen en tan sólo tres generaciones, y que en 10 llegaban a extinguirse las dos terceras partes de ellos. Pasado ese punto parece producirse una especie de estabilidad. Veamos cómo la explica Matthew M. Cammen, de Painted Post, Nueva York: "Al cabo de, pongamos por caso, 50 generaciones, la mayoría de los apellidos disponen de más de 100 individuos masculinos que contraen matrimonio." ¿Llegará alguna vez el número de apellidos a reducirse hasta sólo uno? Craig J. Albert, de Nueva York, se muestra escéptico. La experiencia adquirida con NEOÁRBOL demuestra que habrá que ser "extraordinariamente tenaz" en la espera de tal acontecimiento. Como siempre, la respuesta depende del modelo adoptado. En el caso de un modelo abstracto, en el que la población crezca continuamente, tal vez unos 200 apellidos sobrevivan eternamente. Sin embargo, ningún ordenador puede albergar sino un número finito de símbolos humanos. Cuando se alcance el límite máximo, el número de apellidos comenzará a declinar. Pasado el año gúgolplex A.D. ($10^{10^{100}}$), Smith, o Chan, se perderán para siempre.

Rollo Silver, de San Cristóbal, Nuevo México, ha propuesto la creación de un boletín consagrado al conjunto de Mandelbrot, y estaría encantado de tener noticias de lectores dispuestos a aportar originales o a suscribirse a él.

Taller y laboratorio

Se recorren los pasos de la purificación original del aluminio, que ahora cumple su centenario

Jearl Walker

En Estados Unidos, la industria del aluminio debe su existencia al extraordinario trabajo realizado, en 1886, por Charles Martin Hall, cuando descubrió un método para obtenerlo. Norman C. Craig, del Oberlin College, ha reconstruido los trabajos de Hall. Voy a describirles esta aventura de Craig basándome en sus propios manuscritos y en las investigaciones históricas de Emily Nunn y William Bigglestone.

Hall realizó su hallazgo a los veintidós años de edad, ocho meses después de graduarse en Oberlin. Había habilitado su laboratorio en la leñera, detrás de la casa de sus padres, y entre sus primitivos útiles de trabajo se contaban algunos elementos que él mismo había construido. Desde muy joven había estado inmerso en libros de química; sin embargo, sólo había cursado dos trimestres de esa disciplina. Su profesor había sido Frank F. Jewett.

Jewett había incluido en sus clases las propiedades del aluminio, mostrando un trozo del metal que había traído de Europa. Para obtenerlo, se seguían entonces unos procedimientos químicos tan costosos que su precio de venta era similar al de la plata. Jewett expuso a sus alumnos que quien diera con un método para producir aluminio comercialmente beneficiaría a la humanidad y se enriquecería. Hall, que ya había estudiado metalurgia del aluminio, se giró hacia otro alumno y afirmó: "Voy por él".

El método de obtención del aluminio no había progresado mucho desde los trabajos de Hans Christian Oersted, científico danés a quien se recuerda por sus investigaciones en los inicios de la electricidad. Oersted calentó una mezcla diluida de amalgama de potasio (potasio metálico disuelto en mercurio) y cloruro de aluminio. Tras eliminar el mercurio por destilación, halló una pequeña porción de una sustancia gris que supuso era aluminio. En 1827, el químico alemán Friedrich Wöhler acometió la repetición del experimento. No habiendo tenido éxito, sustituyó la amalgama de potasio por potasio metálico. Merced a esa sustitución, la experiencia rindió únicamente aluminio en forma de polvo negro. Hasta 1847 no acertó Wöhler a conseguir una muestra de aluminio lo bastante grande para revelar las propiedades del metal.

En 1854, el químico francés Henri Etienne Sainte-Claire Deville perfeccionó el método de Wöhler sustituyendo el potasio metálico por sodio metálico. Una muestra del aluminio obtenido por la técnica de Sainte-Claire Deville se exhibió en la exposición de París de 1855. Aquel metal demostró ser robusto, liviano, duradero y resistente a la corrosión. Entre quienes quedaron impresionados, estaba Napoleón III, quien imaginó equipar a su ejército con materiales de aluminio para la inminente guerra con Prusia. Comisionado por Napoleón, Sainte-Claire Deville perfeccionó sus técnicas, pero el aluminio siguió resultando demasiado caro para que su uso se extendiera. Desde 1860 hasta 1880, la producción mundial del metal rondaba las 1,5 toneladas anuales.

Hacia el decenio de 1880, el mundo conoció las posibilidades industriales del aluminio. Con estos antecedentes, Hall inició su trabajo. Al principio, e igual que otros experimentadores, trató de reducir el aluminio a partir de óxido de aluminio (alúmina) por métodos puramente químicos. Para ello, él y su hermana mayor, Julia, preparaban el óxido de aluminio con alumbre casero y carbonato sódico. (Julia le ayudó de otras muchas formas, aprovechando la química que había aprendido en sus estudios.)

Hall intentó también reducir los costes de producción del aluminio por el método de Sainte-Claire Deville, buscando una manera barata de preparar cloruro de aluminio anhidro. Experimentó con la reacción entre el sodio metálico y el fluoruro de aluminio y sodio llamado criolita ($AlF_3 \cdot 3NaF$), tratando de hallar un método de reducción química nuevo y barato. Ninguna de estas experiencias se mostró prometedora.

Desde los tiempos escolares de Hall, él y Jewett habían comenzado a investigar acerca de la posibilidad de obtener aluminio puro haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una sal de aluminio disuelta en agua. Esta sal da iones, positivos, de aluminio. La esperanza de ambos era que, cuando la corriente atravesara la solución, los electrones de la corriente se combinarían con los iones aluminio produciendo aluminio metálico.

Para tales experimentos de electrolisis hacía falta una corriente continua de varios ampère, difícil de producir en una pequeña ciudad como Oberlin. Y así, Hall y Jewett recurrieron a un elemento electroquímico clásico, inventado a principios del siglo XIX por Robert Wilhelm Bunsen, cuyo mechero de gas todavía se encuentra en los laboratorios. La batería Bunsen-Grove, así se la conoce, consta de uno o varios elementos. Cada elemento consiste en un vaso de cerámica porosa que contiene ácido nítrico concentrado. En él se inserta un electrodo de varilla de carbono. El vaso descansa en un recipiente lleno de una solución diluida de ácido sulfúrico (una parte de ácido por 10 partes de agua). En el ácido sulfúrico, el electrodo es una chapa de zinc que se curva siguiendo el recipiente hasta casi formar un cilindro. La batería da unos 1,9 volt entre bornes, actuando la varilla de carbono de electrodo positivo.

En el ánodo, el zinc se convierte en Zn^{2+} (ion positivo) y se liberan electrones. En el cátodo, esos electrones se combinan con H^+ y NO_3^- para dar dióxido de nitrógeno gaseoso y agua. La batería de Hall constaba de siete elementos, los cuales generaban una corriente de entre cinco y diez ampère según como los conectara.

Los experimentos electrolíticos iniciales se llevaron a cabo con fluoruro de aluminio disuelto en agua. Para decepción de Hall y Jewett, los productos de la reacción fueron hidrógeno gaseoso e hidróxido de aluminio en el cátodo. Estos experimentos se realizaron en el laboratorio de Jewett durante el último curso de Hall, y éste, tras su graduación en 1885, trasladó la mayoría de sus investigaciones a la leñera.

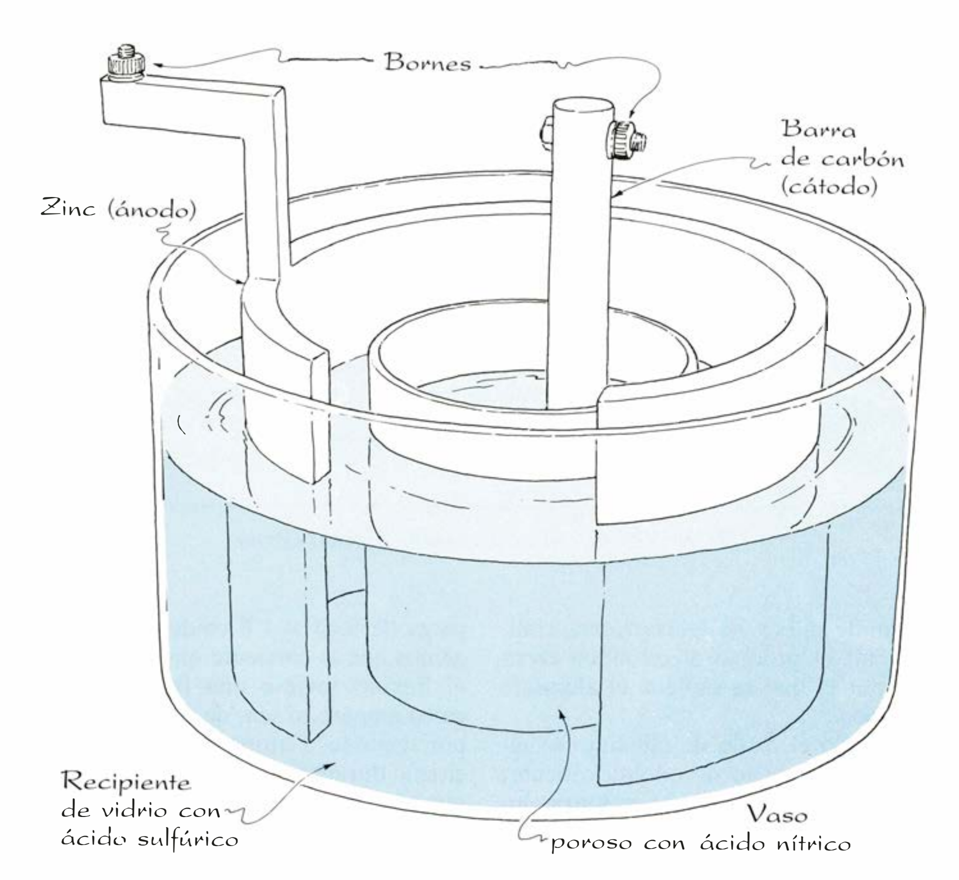
Como las soluciones acuosas de las sales de aluminio habían probado ser poco prometedoras, Hall comenzó a considerar las posibilidades del óxido de aluminio disuelto en sales fundidas, o sea, en sales calentadas hasta su punto de fusión. En su mayoría, las sales fundidas son líquidos de viscosidad y conductividad térmica similares a las del agua; además, son buenas conductoras de la electricidad. (En aquellos tiempos, la idea de disolver óxido de aluminio en cualquier otra cosa resultaba atrevida, ya que tal material se consideraba inerte, razón por la cual solía usarse en los ladrillos refractarios.)

El horno de carbón que Hall había empleado en experimentos anteriores no podía generar ni mantener las altas temperaturas necesarias para trabajar con aluminio. Por consiguiente, montó un quemador de gasolina para que calentase el interior de un tubo de hierro que revistió de arcilla. Este nuevo horno, si bien podía fundir algunos fluoruros, tales como los de potasio y sodio, no fundía otros, tales como los de calcio, aluminio y magnesio, que no se licúan hasta una temperatura de, por lo menos, 1260 ºC. Desgraciadamente, las sales de fluor puras que sí fundían en el horno disolvían poco óxido de aluminio.

Hall era un lector ávido de *Scientific American*, que aparecía entonces cada semana. Craig cree que el trabajo de Hall sobre la electrolisis se lo sugirió un artículo del número del 24 de octubre de 1885, en el que se informaba del éxito de un tal Mr. Graetzel en la producción de magnesio puro tratando electrolíticamente una sal de cloro fundida. Posteriormente, Hall reconocería que el proceso por él descubierto era similar al de Graetzel.

Aún tenía Hall que resolver el problema de que su horno era incapaz de producir temperaturas suficientemente altas para fundir algunas de las sales puras que pudieran disolver cantidades apreciables de óxido de aluminio. Decidió así experimentar con criolita, que es una mezcla de fluoruro de sodio y fluoruro de aluminio. Las mezclas de sales tienen muchas veces unos puntos de fusión inferiores a las de las sales de las que se obtienen. Tras sintetizar una muestra de criolita, Hall comprobó que su punto de fusión caía dentro de las posibilidades de su horno. En ensayos posteriores, añadió más fluoruro de aluminio para rebajar el punto de fusión. Luego, cuando añadió óxido de aluminio al líquido caliente, comprobó que se disolvía fácilmente. El 10 de febrero de 1886, los experimentos habían finalizado.

Seis días más tarde, Hall realizó otro experimento crucial. ¿Podría conseguir aluminio puro enviando una corriente eléctrica a través de la sal líquida en la que había disuelto el óxido de aluminio? Introdujo dos varillas de grafito en la solución caliente, que mantenía en un crisol de arcilla. Una de éstas la conectó al borne de baja tensión de la batería Bunsen-Grove y la otra al borne de alta tensión, dejando que la corriente circulara durante unas dos horas. Luego, vertió la solución en una sartén. Cuando el material se hubo enfriado y solidificado, lo rompió en trozos. El experimento había fracasado. El depósito sobre el cátodo era gris y no lustroso como él sabía que debía ser el aluminio.



1. Batería Bunsen-Grove como la utilizada por Charles Martin Hall en 1886

Repitió el experimento con el mismo resultado. Por fin, cayó en la cuenta de que el depósito gris procedía probablemente de la sílice contenida en la arcilla del crisol. En efecto, la sílice podía disolverse en la solución caliente y, entonces, el silicio podía reducirse a su forma elemental merced a la corriente eléctrica. Cambió el crisol por otro de grafito. No se trataba de ninguna sustitución irrelevante: por aquellos años era muy difícil conseguir barras de grafito de buen tamaño. Opina Graig que Hall consiguió el grafito en la vecina Cleveland, donde la Compañía Brush Electric & Power disponía de existencias para su trabajo en la nueva industria de iluminación por arco y en la fabricación de dinamos.

El 23 de febrero ya estaba instalado el crisol de grafito. Repitió la prueba. La corriente estuvo circulando durante dos horas, al cabo de las cuales desconectó la batería, vació la solución y la dejó enfriar y solidificar. Luego rompió en trozos el material sólido. En su interior había varias pepitas de brillante aluminio puro.

Ignoraba Hall que había estado compitiendo con Paul L.T. Héroult, un francés que descubrió un proceso similar y que, en abril, presentó la solicitud de una patente francesa. En

$$Zn = Zn^{2+}(\text{acuoso}) + 2e^-$$
ánodo (−)

$$2H^+(\text{acuoso}) + NO_3^-(\text{acuoso}) + e^- = NO_2(\text{gaseoso}) + H_2O\ (\text{líquido})$$
cátodo (+)

3. Reacciones en el proceso Hall-Héroult de obtención del aluminio

$$Al^{3+}(\text{disuelto}) + 3e^- = Al(\text{líquido})$$
cátodo (−)

$$2O^{2-}(\text{disuelto}) + C = CO_2(\text{gaseoso}) + 4e^-$$
ánodo (+)

2. Reacciones en un elemento Bunsen-Grove

honor de ambos, se llama proceso Hall-Héroult el proceso electrolítico esencial por el que se obtiene el aluminio metálico.

Cuando el óxido de aluminio se disuelve en el baño de criolita caliente, se disocia probablemente en iones aluminio (Al^{3+}) e iones oxígeno (0^{2-}). Estos, en el ánodo, se combinan con el carbono del electrodo dando dióxido de carbono gaseoso, que escapa del líquido por burbujeo. Esta conversión libera electrones que son impulsados, a través del electrodo, hacia el borne de alta tensión de la batería. Entonces, del borne de baja tensión salen electrones, y éstos fluyen por el baño caliente al otro electrodo, en el que se combinan con los iones aluminio para dar aluminio líquido. A medida que el aluminio se acumula, se va combinando en glóbulos que se hunden al fondo del baño a causa de la menor densidad del electrolito circundante. Esos glóbulos se enfrían y solidifican, formando pequeñas pepitas de aluminio. Actualmente, Alcoa (la compañía americana de aluminio) tiene expuestas al público algunas de las pepitas obtenidas por Hall. A ellas se refieren llamándolas "las Joyas de la Corona", no sólo por su brillo sino por su importancia histórica.

La cantidad máxima de aluminio que se redujo en el experimento puede calcularse a partir de la intensidad de la corriente que circulaba por el líquido. Para reducir un ion Al^{3+} a un átomo neutro Al hacen falta tres electrones. Para reducir un mol de aluminio harán falta tres moles de electrones. Un mol de electrones tiene una carga igual al producto de $6{,}022 \times 10^{23}$ (número de Avogadro) por $1{,}6 \times 10^{9}$ coulomb (carga de un electrón); es decir, una carga de $9{,}64 \times 10^4$ coulomb. Supongamos que la corriente que atravesaba el líquido tuviese una intensidad de cinco ampère, o sea, de cinco coulomb por segundo. Entonces, si la corriente circuló durante dos horas, la carga total que pasó por el líquido fue de $3{,}6 \times 10^4$ coulomb, equivalente a 0,37 moles de electrones. La corriente, pues, pudo reducir un total de unos 0,12 moles de aluminio. Como un mol de aluminio tiene una masa de 26,98 gramos, aquella corriente pudo producir unos 3,4 gramos de aluminio. La densidad del aluminio es de 2,698 gramos por centímetro cúbico. Así, si todo aquel aluminio se hubiese reunido en una pepita esférica, el diámetro de ésta sería de 1,3 centímetros. En la práctica, por pérdidas de rendimiento en el proceso, se produce una cantidad de metal que es aproximadamente la mitad de la teórica.

Por una carta que Hall escribió a su hermano el mismo día en que su experimento tuvo éxito, sabemos que la criolita permaneció básicamente inalterada por el paso de la corriente y, por ello, el proceso pudo continuar. Así pues, conforme la cantidad inicial de óxido de aluminio se va reduciendo a metal puro y sale de la solución, puede irse disolviendo más óxido de aluminio en la sal fundida. Proseguirá la formación de más aluminio puro en tanto fluya la corriente y vaya introduciéndose más y más ánodo (que se va consumiendo) en el líquido.

Craig recreó el experimento de Hall en un horno electrolítico capaz de alcanzar los 1000 grados C. Los ingredientes se funden en un crisol de grafito del número 0000 de tipo "plombagina" (118 mililitros de volumen). Este crisol descansa, a su vez, en otro de níquel que lo protege de las pérdidas en caso de que el grafito se fisure durante el calentamiento. Este crisol de níquel descansa sobre una banda de hierro dulce de tres milímetros de grueso y 19 milímetros de ancho, que se curva extendiéndose por debajo del crisol, y también hacia arriba, saliendo de la boca del horno. La banda sirve de conexión al borne de bajo potencial de la fuente de alimentación eléctrica. La banda, el crisol de níquel, el crisol de grafito y el líquido caliente forman parte del trayecto de la corriente eléctrica.

La conexión al borne de alto potencial de la fuente de alimentación la consigue Craig a través de una barrita de grafito sumergida en el líquido caliente. Esa barrita mide ocho milímetros de diámetro y 30,5 centímetros de longitud; igual que con la banda de hierro, se conecta a la fuente de corriente continua mediante pinzas de cocodrilo de tamaño grande. Una abrazadera aislante mantiene la barrita en su posición. La temperatura del horno se registra con un termopar de cromel-alumel revestido por una vaina cerámica que llega hasta el fondo del horno. Una campana química instalada por encima del conjunto extrae los vapores de flúor que se generan en el experimento.

Craig llena el crisol con una mezcla de 130 gramos de fluoraluminato de sodio (criolita) y 40 gramos de fluoruro de aluminio. Cuando esa mezcla funde a los 830 grados C, le agrega tres gramos de óxido de aluminio finamente pulverizado. Seguidamente inserta la barrita de grafito y conecta la fuente de alimentación. La diferencia de tensión eléctrica entre la barrita y la banda de hierro es de unos cinco volt y la corriente de unos 10 ampère.

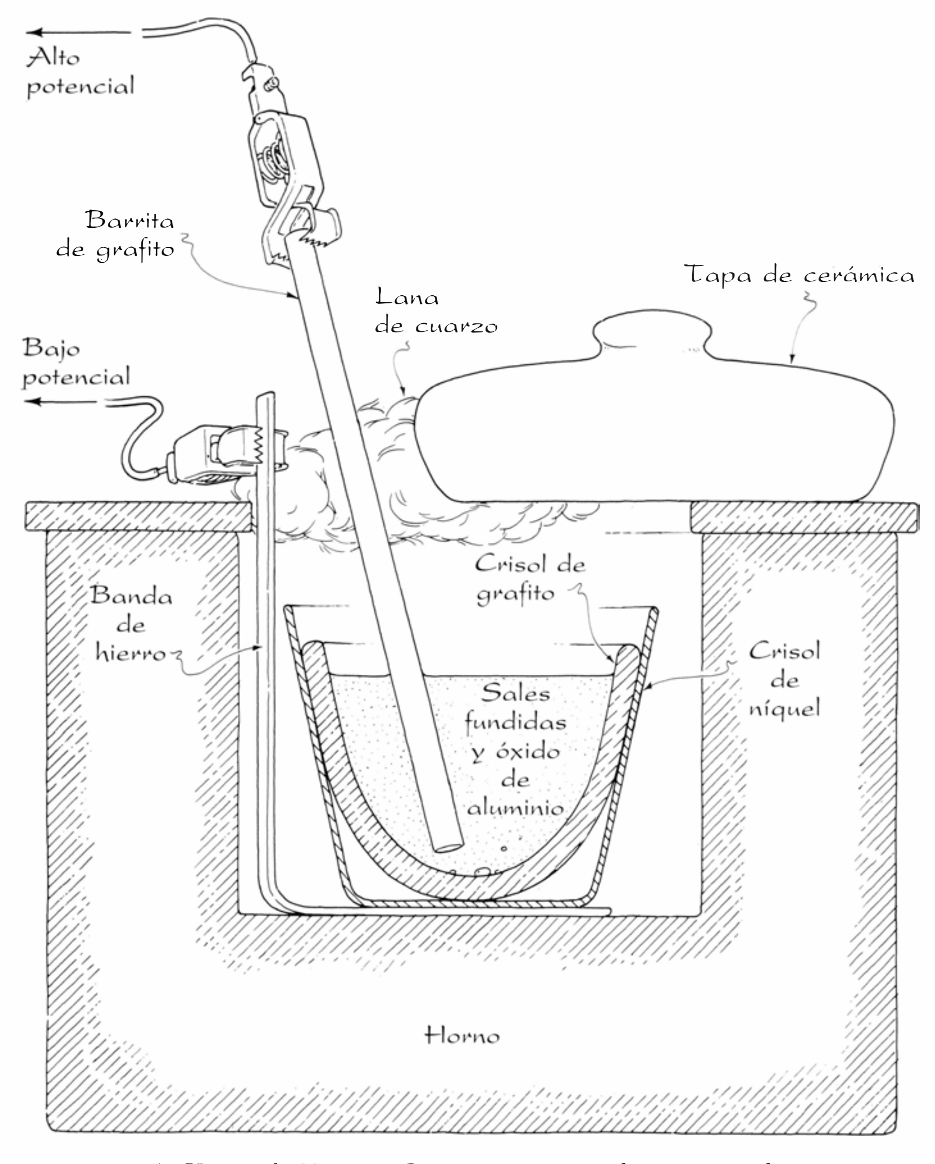
Para reducir la pérdida térmica, se emplea una tapa cerámica que cubre la mayor parte de la boca superior del horno. La barrita de grafito se hace pasar por la parte que queda abierta, que Craig rellena con lana de cuarzo. El horno se hace trabajar a unos 930 grados C. La corriente se mantiene durante cuatro horas, tiempo durante el cual se añaden otros dos gramos de óxido de aluminio para reponer la cantidad en solución. La barrita de grafito, conforme se consume, se va haciendo entrar en el líquido. En este experimento, la barrita llega a consumirse, por lo menos una vez, hasta un punto tal que debe reponerse.

Una vez frío el horno, se saca el crisol de grafito y se abre rompiéndolo con un martillo. En el fondo aparece una pepita de aluminio de un centí-

metro de diámetro. La operación da varias pepitas menores.

Craig sugiere varios cambios para reducir el costo del experimento. El crisol podría calentarse con un mechero de butano en un horno, del tipo del de Hall, hecho de azulejo cerámico. Como fuente de alimentación eléctrica puede usarse una batería de automóvil, combinada con un reostato para reducir el voltaje. El crisol de níquel podría sustituirse por uno de hierro o, acaso, por un jarrón de arcilla. A la banda de hierro podría sustituirla una segunda barrita de grafito, sumergida en el líquido al modo en que lo hizo Hall. No es necesario el termopar, pues la fusión de los materiales de crisol revela la temperatura. Pueden encontrarse otros posibles cambios. Póngase cuidado, empero, en realizar el experimento con la protección de una campana química, u otro medio cualquiera que proporcione una buena ventilación. Se tomarán asimismo medidas para que el líquido caliente no se derrame. Además, hay que prevenirse atentamente contra las sacudidas eléctricas si se emplea una fuente de alimentación de alta tensión.

Podría resultar también entretenido investigar una batería Bunsen-Grove, pero hay que ser sumamente cuidadoso con los ácidos y trabajar en una zona perfectamente ventilada. Craig ha construido una en un vaso de laboratorio de 400 mililitros. Para uno de los electrodos emplea una chapa de zinc, curvándola siguiendo la pared del recipiente, pero sin cerrar el círculo. En esta batería, ha medido una corriente de cuatro ampère. Si alguien repite el experimento de Hall con una batería así, debe asegurarse que dispone de zinc suficiente, ya que se consumen más de quince gramos de zinc por cada gramo de aluminio que se produce.



4. Horno de Norman Craig para extraer aluminio metálico

Libros

Plantas medicinales, artrópodos, matemáticos y sociología exacta

Luis Alonso, Ramón Margalef, Javier de Lorenzo y Manuel G. Velarde y Javier de la Rubia

Livre des Simples Medecines. Codex Bruxellensis IV. 1024. Dos volúmenes. Introducción y adaptación de Carmélia Opsomer; comentarios de Carmélia y William T. Stearn. Photogravure De Schutter; Antwerpen, 1984. Contiene el primer volumen la introducción general de Carmélia Opsomer, la descripción del Codex Bruxellensis y las fuentes del texto, de la misma autora, así como un detenido estudio de William T. Stearn sobre los nombres y las ilustraciones de las plantas en el período medieval. (Stearn, entre otras muchas publicaciones y ediciones críticas de naturalistas británicos sobre todo, ha escrito un valioso manual enciclopédico sobre el latín empleado en botánica.) Viene a continuación el texto modernizado del *Livre des simples medecines* y, tras él, un índice de nombres y de entradas. De este priner volumen existe una edición francesa y otra inglesa. El volumen segundo está consagrado a la reproducción facsímil, bellísima en todo su esplender cromático, del manuscrito.

Si aceptamos que el libro IX de la *Historia plantarum* de Teofrasto lo escribió el albaceas de ideas y bienes de Aristóteles, diremos que el primer herbario completo que nos ha llegado pertenece al siglo IV antes de Cristo. Y porque viene tras la exposición de los puntos principales de la botánica, habría que entenderlo como una aplicación "técnica" de los conocimientos adquiridos sobre la naturaleza de los vegetales. No encontraremos otro naturalista de parejo empuje intelectual hasta San Alberto Magno, cuyo libro sexto de su *De vegetabilibus libri septem* constituye una buena síntesis aplicada de las nociones generales descritas precedentemente. Clío no repartiría, sin embargo, la misma suerte. Mientras que Teofrasto salió de su relativo olvido con la traducción en el siglo XV de Teodoro Gaza, San Alberto tardaría mucho tiempo –quizá hasta Meyer en el XIX–, en ser reconocido en todo su valor. La corriente que inicia Teofrasto y restaura Alberto de Colonia hallará su cauce en Andrea Cesalpino, quien, para no ser menos, acrisolará con el silencio de los demás su valor único hasta Linneo.

Mayor éxito conoció otro curso derivado de ese flujo matriz: la farmacología instaurada con Pedacio Dioscórdies y su *Materia médica*, cuyo exponente máximo actual es, sin duda, *Plantas medicinales*, de Pío Font Quer. Varios factores explican esa fortuna dispar. El más próximo, el carácter perentorio de la sanación que reclama una guía inmediata de males y remedios. De lo acertado de esos elencos dan fe el número elevado de plantas reputadas antaño como medicinales que todavía siguen reclamándose para curar los fallos habituales del cuerpo humano, elaboradas en "electuarios", "emplastros", "decocciones", "trituraciones", "píldoras", "colirios" y "jarabes", ahora más refinados.

Cierto es que las listas de plantas beneficiosas y dañinas nacen casi con la escritura. Las grandes civilizaciones tienen sus propios repertorios, como lo atestiguan el *Libro siriaco de las Medicinas* o los extractos que nos han llegado de Diocles de Carystos, entreverados con tradiciones de *rizótomos* (recolectores de raíces) y *farmacópolos* (vendedores de plantas curativas) y otras transmitidas en el folklore.

Pero es innegablemente Dioscórides, médico militar en tiempos Claudio y Nerón, quien va a constituirse en guía indispensable de médicos y boticarios a lo largo de dieciséis siglos. Aunque él agrupó los fármacos por familias, desde el siglo II quedó articulada su obra en una seriación alfabética que, cuando menos, hacía más fácil su consulta rápida. Directa o indirectamente los autores griegos, latinos y árabes van a apoyarse en la *Materia médica*. Será el caso de Galeno (siglo II), Oribasio (siglo IV), Alejandro de Tralles (siglo VI), Pablo de Egina (siglo VII), Aecio de Amida (siglo VII), Rabano Mauro (siglo VIII) y Wahlafrid Strabo (siglo VIII), Rhazes (siglo IX) y Avicena (siglo X). Sufre una definitiva reorganización en el siglo X. Esa versión "es el famoso *Dioscorides alphabeticus*, que se utilizó como modelo directo del *Livre des simples medecines,* el *Circa instans* de Platearius" (Opsomer).

Peternecía M. Platearius a la escuela de traductores de Salerno por la que entraron, en versión latina, muchas obras del saber árabe medieval. Se le atribuyen, además del *Circa instans*, un tratado terapéutico (*Practica brevis*) y un antidotario (*Glossae super Antidotarium Nicolai*). Su libro *De simplici medicina*, título propio del *Circa instans* que no son otra cosa que las dos palabras iniciales del mismo, describía 273 fármacos simples dispuestos en orden alfabético, compilando lo escrito antes por Dioscórides, Galeno, Oribasio y Constantino el Africano, este último figura máxima de la escuela salernitana. (Quizá sea oportuno recordar que los autores medievales no tenían excesivos escrúpulos a la hora de apropiarse párrafos enteros de los autores clásicos, o incluso contemporáneos. Esa práctica se observa todavía en el siglo XVI, en que el propio Conradus Gesner transcriba como propios "simples" enteros de Dioscórides sin el menor rubor.)

A través, pues, del *Circa instans* se introduce Dioscórides en el mundo occidental. Este herbario se convierte, copiado en número infinito de manuscritos, en el manual indispensable, multiplicando su eficacia mediante las versiones del mismo al francés, inglés, alemán, danés, provenzal y hebreo. Opsomer menciona su peso en la redacción de las enciclopedias del siglo XIII. (El lector hispanohablante cuenta con la fortuna de una espléndida edición del *De natura rerum*, de Tomás de Cantimpré, un clásico entre esas enciclopedias. Si consulta las voces de las plantas medicinales en particular los libros 11 y 12, advertirá cómo el autor seguido de manera casi exclusiva es Platearius.) En 1422 la Facultad de Medicina de París imponía su obligatoriedad a los farmacéuticos.

Pero desde Salerno hasta el decreto

parisiense habían transcurrido cuatro siglos de copia, interpolación y degradación, en los que se hace preciso distinguir al menos dos corrientes de interpretación principales. Una de las cuales conduciría hasta el *Livres des simples medecines*, ahora impreso en facsímil con todo lujo tipográfico. No llega, empero, en puridad. O por mejor decir, el caudal ha doblado su volumen con la avenida del *Herbarius* del pseudo-Apuleyo. Fue Bartolomeo Mini quien reunió el *Circa instans* y el *Herbarius* para componer su *Tractatus de Herbis*, y, de éste, con añadidos de menor cuantía que Opsomer detalla, surgió el *Livre des simples medecines*. Esta aborda luego la naturaleza de las ilustraciones y la autoría de las mismas, el contenido botánico, médico y farmacéutico en una sumaria síntesis que no resta un ápice a la claridad cartesiana de la exposición. Capítulos más especializados son los destinados a la descripción del *Codex* reproducido en el volumen segundo y el tramado lingüístico-botánico de fondo de la farmacología medieval.

Pocas veces van a encontrar nuestros centros superiores (facultades de biología, medicina y farmacia, institutos botánicos, departamentos de historia medieval, bibliotecas públicas) una razón de mayor peso para justificar sus adquisiciones que al hacerse con esta obra. (L.A.)

ARTROPODS (I). Volumen coordinado por J. Armengol. *Història natural dels Països Catalans*, vol. 9. Enciclopedia Catalana; Barcelona, 1986. Desde hace tiempo han proliferado los libros de "Historia Natural", a un nivel más alto o más bajo de divulgación, en los que, siguiendo un orden taxonómico convencional, se daban unas nociones de botánica o zoología, según el tomo, con el acompañamiento de datos más o menos anecdóticos, generalmente seleccionados por su "amenidad", a juicio del redactor, sobre plantas y animales diversos, y mejor si vivían en países muy lejanos Libros de este tipo se podían traducir con cierta facilidad y han estado alimentando a una considerable industria editorial. Recientemente, el interés por la "ecología" quizá haya reactivado el asunto, a pesar de la competencia de la televisión, pero probablemente ya estemos saturados de fotografías de lagartos gigantes y de pingüinos. Más peligrosa era la traducción de obras referidas de manera precisa a un país determinado y no lejano, de Centroeuropa, que podía hacer pensar que lo allí descrito se encontraba naturalmente en España. Buenas "guías de campo" al uso dan una idea algo sesgada en lo que se refiere a la Península Ibérica, aunque su título de adopción sea, por ejemplo: "Guía de campo de los escarabajos de España y Europa."

El volumen que da pie a este comentario es ya el quinto que se publica de una nueva serie excelente que aúna lo tradicional de las "historias naturales" con una referencia muy precisa a una extensión geográfica que abarca buena parte de la España mediterránea, incluidas las Baleares. Tiene una redacción muy competente y una ilustración soberbia y absolutamente original. La serie ha sido proyectada y realizada bajo la dirección del Dr. Ramón Folch Guillén y en ella colabora un número grande de especialistas. El buen ritmo que ha seguido la publicación permite esperar que la obra entera quedará concluida dentro de los plazos previstos. La redacción en catalán no puede ser obstáculo serio para la comprensión de un texto de esta índole por una persona educada en alguna lengua románica. Y la ilustración, por sí sola, merece la pena.

La posibilidad de haber realizado esta obra, y la novedad de la misma, se fundamentan en la existencia de una nueva generación muy numerosa de naturalistas que se han especializado en diversas direcciones, cubriendo de manera extensa, aunque no total, un campo que había estado tradicionalmente descuidado: el de la florística y la faunística locales. Ciertamente había buena información sobre fanerógamas, sobre aves y mariposas y algunos grupos más; pero aquí se nos presenta la riqueza de otros grupos que habían atraído menos atención. Los crustáceos están excelentemente estudiados y descritos; sorprenden también los progresos realizados, por ejemplo, en el estudio de los miriápodos. Sin embargo, los ácaros siguen en estado lastimoso y, por supuesto, es insuficiente e inexacto decir que los oribátidos son principalmente saprófagos. Esta posible desigualdad en el tratamiento de los diversos grupos es la crítica más seria que podría hacerse a la obra. Pero inevitable y representa una etapa, esperemos transitoria, en la línea de progreso. Para ciertos grupos el libro puede servir de "guía de campo"; la simple serie de ilustraciones de cladóceros constituye una guía insuperable para conocer los cladóceros de la Península Ibérica; pero, por desgracia, todavían quedan muchos grupos de los que sabemos muy poco. Todo esto, por supuesto, se puede deducir de la forma de presentación y de la bibliografía disponible que se relaciona. Y a este respecto se puede añadir que la novedad de la obra es tal que, para ciertos grupos, figuran, en estas páginas aparentemente de divulgación, novedades del más alto interés científico.

El texto es correcto y claro, en general; a veces se pierde la ocasión de introcudir ciertas generalizaciones, como por ejemplo, al hablar de las telas de las arañas, o del carácter hidráulico que tienen los movimientos de sus extremidades. Hay pocas repeticiones que, probablemente, son inevitables. El lenguaje es cuidado, aunque hablar de medio muscícola o lapidícola, en vez de medio muscinal o lapídeo, hace pensar en otros usos tan indeseables como generalizados (medio ambiente, fauna piscícola). Uno podría siempre encontrar algunas críticas menores, *Penilia* no es carnívoro, y el hallazgo de miriápodos en las cavidades naturales del hombre (p. 394) tiene más visos de una broma (¿debida a Giard?) que se perpetúa, que no de realidad. Este volumen cubre todos los artrópodos, a excepción de los insectos.

Quiero insistir otra vez sobre la calidad de la ilustración. Las fotografías son insuperables y algunas ofrecen un detalle exquisito para placer del naturalista. Y nunca se trata de ejemplares exóticos ni de envarados especímenes de museo. Los dibujos, aunque realizados por diferente mano y con distintos estilos, son en general muy atractivos, especialmente los debidos a unos cuantos colaboradores que unen unas dotes envidiables de artista a su cualidad de naturalistas. (R. M.)

FUNDADORES DE LAS MATEMÁTICAS MODERNAS, por F. Gareth Ashurst. Alianza Editorial; Madrid, 1985. La historia de las matemáticas está hecha por personas (p. 9), afirma el autor. Más bien, por el tema desarrollado en el libro, cabría afirmar que es la matemática la que está hecha por matemáticos. En cualquier caso, una afirmación que se muestra aparentemente trivial, tópica. Pero sólo aparentemente porque constituye una toma de postura que, al menos, implica dos aspectos:

1. Por un lado, marginarse a lo que hoy parece llevarse en la historia del hacer matemático, en sus dos frentes: aquel que sólo ve sociologismo e historia externa o aquél que sólo considera en la matemática verdades atemporales, eternas. Dos frentes de estudio por el que la matemática parece

producto de una abstracción o clase sociológica, o bien el resultado de un descubrimiento, unos teoremas y proposiciones dados de antemano y que no se sabe muy bien quién los ha colocado donde están. En este sentido, el autor adopta como posición de partida la afirmación de que la matemática es un producto humano, que depende tanto de la época como de la personalidad y el carácter de cada uno de los matemáticos que la trabajan y producen.

2. Si es obra de personas, de matemáticos, entonces en esa obra podrán presentarse fallos, errores, hasta sorpresas. No sólo contenidos dados de una vez para siempre. Como producto humano, algunos temas mostrarán gran fecundidad; otros, ninguna. En unos momentos, y según el carácter propio del matemático, se trabajarán unos temas, se orientarán de una u otra forma.

Son dos aspectos que el autor de este libro reafirmará de modo permanente, en especial el segundo, aunque en ningún momento plantee estas dos premisas como elementos de los que obtener una serie de consecuencias, como las aquí esbozadas. A pesar de lo cual hay que destacar que, al aceptarlas, el autor se alinea con una vieja corriente que afirma el carácter individual de la creación humana, lo que no es obstáculo para que también se alinee con una posición que hoy se está resaltando con exceso: aquella que ve la matemática como una disciplina en crisis, en permanente decepción en cuanto a sus resultados, en cuanto a sus métodos. A eso hace referencia al final del libro (p. 189), en el epílogo, cuando señala que en el siglo XX la decepción ha sido la nota dominante en los intentos por resolver muchos de los problemas planteados en el siglo anterior. Decepción que hace referencia tanto a fracasos en intentos demostrativos de proposiciones como, sobre todo, a la propia razón humana que parece presentar una serie de limitaciones precisamente allí donde se mostraba como la dominadora absoluta. Sin embargo, y como contrapartida, Ashurst apunta alguna novedad que cree positiva: la resolución hecha por Appel y Haken en 1976 del clásico problema de colorear un plano, resolución en la que se ayudaron del computador, del que tuvieron que utilizar cerca de mil horas. Ello implica la posibilidad de unos límites en los procesos tradicionales, en la razón, así como la de incorporar a los métodos demostrativos tradicionales los de computación.

Desde estas tomas de posición, el autor de este libro ha elegido la figura de 10 matemáticos para indicar el enlace entre vida y producto que, en cada caso, han realizado. Elección de acuerdo con lo que hoy se califica de "matemática moderna". Término que, desde mi punto de vista, es radicalmente desafortunado aunque pueda ser comercialmente atractivo. En el fondo, la elección ha sido realizada desde un enfoque algebraico en el sentido de estimar como "moderno" el enfoque estructuralista –lo que hoy sería discutible–; y ello se refleja en adoptar la noción de grupo como apoyatura para destacar las distintas contribuciones. Lo que no encaje con este armazón se menciona, pero no se expone. Ello condiciona, igualmente, los límites electivos en el terreno temporal: el XIX. Los matemáticos de los que se realiza una breve biografía son Galois, Hamilton, Boole, Cayley, Dedekind, Cantor, Klein, Peano, Hilbert y una referencia al matemático que nunca existió, Nicolás Bourbaki. En el epílogo, y en función de la mencionada "decepción", se hace referencia a Gödel.

Naturalmente, la biografía de los matemáticos entraña un nuevo problema: si la vida simplemente, si la exposición detallada y en versión original de los temas de trabajo, si la búsqueda de un término medio. El autor ha pretendido esta última vía. Y así, junto a una exposición de la vida de cada matemático pretende aportar una información, breve, de sus trabajos. Con una dificultad: en muchos casos, y a pesar de los matemáticos elegidos, los temas requieren de una gran especialización tanto del expositor como del lector. Ante esto, el autor del libro ha optado por tratar algunos temas, ligados en general a la noción de grupo, e intentar un esbozo de las ideas elementales que se encuentran subyacentes en dichos temas. Así, en el caso de Evariste Galois –el elegido de los dioses, como lo calificara Infeld–, tras una narración de su corta vida que no alcanza los 21 años y en la que no hay una radical exactitud en los datos, Gareth Ashurst pasa a exponer, con una "simplificación extrema", el concepto de grupo mediante "las ordenaciones de letras o números conocidas como permutaciones" (p. 27). Es claro que tal exposición no corresponde, para nada, a las ideas de Galois y, por su brevedad, no sé si al lector desconocedor de la matemática se le aclara algo este concepto.

Lo mismo ocurre en las restantes biografías, como la de Hamilton, en la que, junto a la vida de este precoz políglota, se expone el álgebra de los cuaterniones o se menciona "El famoso teorema de Hamilton-Cayley..." (p.46), famoso para los matemáticos pero del que nada se indica ni siquiera en la posterior biografía de Cayley; y, aquí, el tema matemático se centra en las matrices... En este aspecto, quizá el capítulo más grato al lector sea el dedicado a Félix Klein, en el que se realiza una muy sucinta pero clara exposición de los conceptos de geometría y su clasificación para tratar de aclarar la importancia del denominado "programa de Erlangen" desarrollado por Klein en 1872 y que tanta trascendencia tuvo no sólo para la matemática sino para el posterior desarrollo de la física.

La consecución de un término medio entre biografía y elemento conceptual matemático no queda plenamente lograda en este libro. Ese elemento conceptual se devalúa o trivializa quizás en exceso. Y ello muestra, una vez más, la dificultad de enlazar ambos aspectos y, más, en el terreno de la divulgación.

Sin embargo, y en función del "gran público" al que quiere remitirse el libro, éste presenta un interés cierto al insistir en el hecho de que los matemáticos, que son quienes hacen las matemáticas, también son personas, con sus virtudes y sus defectos; con sus niños prodigio o sus hombres maduros; con aficiones a otros campos –música, literatura, pintura...–, al montañismo o a la bebida; con sus polémicas, entusiasmos y depresiones... Quizá constituya una forma de acercar la matemática a un público que parece estimarla como algo esotérico y campo de trabajo de personas "especiales", cuando son tan especiales como todas las que dedican su tiempo, su esfuerzo, al trabajo conceptual.

El libro se completa con una breve bibliografía y un apéndice que contiene los axiomas de la estructura de grupo. (J. de L.)

CONCEPTS AND MODELS OF A QUANTITATIVE SOCIOLOGY. (THE DYNAMICS OF INTERACTING POPULATIONS.), por W. Weidlich y G. Haag; Springer-Verlag; Berlín, 1983. Frente a la física tradicional, la sociología es, por un lado, una ciencia cuya estructura formal y matematización aún no están cuajadas, por lo que, en general, no cabe esperar fiabilidad muy aceptable en sus predicciones cuantitativas o incluso cualitativas. Por otro lado, adolece de la posibilidad de repetición de los experimentos, cuando ello fue lo fundamental en el establecimiento y estabilidad de las leyes físicas. Más aún, la sociología es una ciencia del com-

portamiento y evolución de grupos donde suele ser rara la relación lineal entre causa y efecto. Así, modelos tan sencillos y útiles como el gas perfecto o el sólido armónico en física corresponden a algo tan irrelevante en sociología como un sistema de "robinsones sin interacción" del que un comportamiento colectivo no es posible.

La física moderna, la de los últimos cuarenta años, ha empezado a ocuparse de fenómenos colectivos, de problemas cooperativos/competitivos en situaciones estáticas (de equilibrio, así las transiciones de fase entre diferentes estados de la materia inanimada) y dinámicas (sistemas en evolución muy alejada del equilibrio). Es la física de los procesos regidos por leyes no lineales, tales como las de retroalimentación, retardo espacial o temporal, etcétera, para los que los modelos sencillos antes mencionados también son poco útiles. Los problemas de evolución de colectivos son muy complejos tanto por su fenomenología como por su formalización, incluso para entes inanimados (imanes, reactivos químicos) debido, entre otras razones, al parco desarrollo de técnicas matemáticas, tanto deterministas como estocásticas. Por eso cabe decir que la sociología se ocupa desde un principio de problemas, sus problemas sencillos, tan complejos como los más complejos de la física moderna. La ventaja de esta última ciencia es que tiene siglos de historia y de éxitos y ellos guían, pese a todo, nuestro avance actual.

Parece, pues, razonable que los físicos se hayan aventurado en el estudio de problemas sociológicos, económicos y políticos. Tal es el caso de los autores del presente libro. Como ellos subrayan, no lo hubieran escrito si no pensasen que asuntos tan complejos como los mencionados pueden y deben ser formalizados con la matematización adecuada. Y ello, conscientes de que la identificación de variables relevantes, de leyes sociológicas, etcétera, es asunto todavía en proceso de elaboración. Precisamente, de la experiencia en física cabe sugerir nuevos caminos, ideas seminales, nuevos métodos de experimentación (?) para los sociólogos.

La obra de Weidlich y Haag provee en sus cuatro primeros capítulos (el total son seis) una excelente introducción al estudio de los procesos estocásticos con estados estacionarios y transiciones entre ellos, a partir de una motivación sociológica, económica, ecológica y política. Se dan las bases microscópicas de la teoría y se desarrolla el uso de ecuaciones de todos los niveles, microscópico, mesoscópico (ecuaciones de Langevin y de Fokker-Planck) y macroscópico (ecuaciones de balance y de evolución determinista).

El libro pone de manifiesto que la dosis de matemática que debiera darse en las licenciaturas humanistas no debiera ser inferior a la exigible en los estudios de física moderna. En las próximas décadas los sociólogos, los políticos y los científicos de esas disciplinas van a tener que manejar bastantes conceptos de teoría de ecuaciones diferenciales, teoría de estabilidad de equilibrios y desequilibrios. Lo demuestra, además, la concesión reciente del premio Nobel de economía a profesionales de excelente formación matemática.

Pero, ¿cuánto es lo conseguido hasta ahora con la sociología (*semi*) cuantitativa (el *semi* lo subrayan los autores en el capítulo primero)? El lector podrá imaginar que bien poco, y lleva razón. En efecto, los autores han estudiado modelos muy sencillos, lo que denominan mínimos, que producen formidables y complejos problemas matemáticos; obviamente, los resultados son muy parcos. Tal es el caso de modelos donde sólo compiten dos ideologías, dos partidos muy diferenciados, uno liberal y otro dictatorial.

¿Qué nos describen de la predictividad, en el plano determinista, en sociología cuantitativa? ¿Qué hay de las transiciones en los colectivos cuando incluso en su mínima expresión sólo compiten dos elementos contrapuestos? ¿Qué hay de la respuesta y estabilidad de los diferentes estados sociales cuando se dan perturbaciones externas débiles o fuertes? ¿Qué hay de la predictividad en unas elecciones parlamentarias? Muy poco y, sin embargo, los resultados parecen muy alentadores. Porque en sociología cuantitativa estamos hoy como cuando, hacia finales del siglo pasado en física, D. Van der Waals intentaba explicar por qué los gases en determinadas circunstancias llegaban a licuarse, a cambiar de fase tras un proceso más o menos violento. Cuáles eran las propiedades de la región de transición, constituía una de sus preguntas. Cien años transcurridos y aquel problema de Van der Waals ya ha sido desentrañado muy satisfactoriamente, lo que justificó el premio Nobel de física de 1982, concedido a K. G. Wilson. Nuestra esperanza es que la sociología progrese más deprisa que la física; la experiencia, el trabajo coordinado entre distintas disciplinas y el uso de potentes ordenadores son algo que Van der Waals y los físicos no tuvieron sino desde hace muy pocos años y que los sociólogos disponen para su uso rutinario.

Así pues, aun cuando la teoría es presentada por Weidlich y Haag de modo bastante general, con posibilidad de muchas variables, la aplicación a casos concretos reduce, al querer obtener algunos resultados analíticos, drásticamente su número a un total de dos o tres como máximo. Por eso cabe decir que el desarrollo matemático del presente libro, la preparación para el ataque de los problemas sociológicos resulta desbordante. (Quizá deba agregarse que hay mucho ruido para pocas nueces: los autores se limitan a estudiar las ecuaciones deterministas que, para mantener el caracter estocástico fundamental de la teoría, deducen a partir de las ecuaciones microscópicas fundamentales, depreciando las fluctuaciones y aportando las ecuaciones deterministas para los valores medios, lo cual sólo es correcto si la distribución estacionaria de probabilidad presenta un único máximo, y las ecuaciones de evolución aproximadas para las varianzas.) Las densidades de probabilidad sólo se calculan de manera exacta para el caso de una única variable y de manera aproximada, puesto que los modelos concretos estudiados no verifican las condiciones de balance detallado que permitirían un cálculo exacto en sistemas de mayor número de dimensiones para el caso de dos variables.

Por eso, desgraciadamente, gran parte de la obra se reduce a un análisis de procesos de bifurcación en ecuaciones deterministas para valores medios, calculados a partir de ecuaciones estocásticas. Pero es un primer libro, seminal; además, un análisis estocástico completo no es posible con los métodos analíticos disponibles. De hecho, en la mayoría de los casos estudiados los cálculos analíticos acaban al obtenerse las ecuaciones de evolución para los valores medios y sus varianzas. A partir de aquí el estudio no puede ser actualmente sino numérico con ordenador.

Dicho todo lo anterior, permítasenos recomendar vivamente este libro pionero a físicos, ecólogos, bioquímicos, matemáticos, sociólogos, economistas y políticos del siglo XXI. Para los economistas, el capítulo quinto sería suficiente (y autosuficiente dentro del libro); los sociólogos quizá disfruten con la ingenuidad del capítulo sexto, ingenuidad que no elimina el carácter seminal del mismo. Por otro lado, la presentación (impresión tradicional, encuadernación en tela, falta de errores) es impecable como es norma en la editorial Springer-Verlag (M.G.V. y J.R.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

FUERZAS NUCLEARES ESTRATEGICAS DE GRAN BRETAÑA Y FRANCIA

FRENCH NUCLEAR DIPLOMACY. Wilfrid L. Kohl. Princeton University Press, 1971.

GREAT BRITAIN'S STRATEGIC NUCLEAR DETERRENT. John F. Rybicki en *Armed Forces Journal International*, vol. 118, n.º 5, págs. 32-36; 1981.

EUROPE'S NUCLEAR SUPERPOWERS. George M. Seignious II y Jonathan Paul Yates en *Foreign Policy*, n.º 55, págs. 40-53; verano de 1984.

ALLIED NUCLEAR FORCES COMPLICATE NEGOTIATIONS. Eric J. Grove en *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 42, n.º 6, págs. 18-23; junio-julio, 1986.

CUASICRISTALES

WHICH TETRAHEDRA FILL SPACE? Marjorie Senechal en *Mathematics Magazine*, vol. 54, n.º 5, págs. 227-243; noviembre de 1981.

METALLIC PHASE WITH LONG-RANGE ORIENTATIONAL ORDER AND NO TRANSLATIONAL SYMMETRY. D. Schechtman, I. Blech, D. Gratias y J. W. Cahn en *Physical Review Letters*, vol. 53, n.º 20, págs. 1951-1953; 12 de noviembre de 1984.

THE STRUCTURE AND STATISTICAL MECHANICS OF GLASS. D. R. Nelson en *Applications of Field Theory to Statistical Mechanics: Proceedings of the Sitges Conference on Statistical Mechanics, Sitges, Barcelona/Spain, June 10-15, 1984*, dirigido por L. Garrido. Springer-Verlag, 1985.

PENTAGONAL AND ICOSAHEDRAL ORDER IN RAPIDLY COOLED METALS. David R. Nelson y Bertrand I. Halpering en *Science*, vol. 229, n.º 4710, págs. 233-238; 19 de julio de 1985.

TRANSPLANTES EN EL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL

NEURAL TISSUE TRANSPLANTATION RESEARCH. Dirigido por Robert B. Wallace y Gopal D. Das. Springer-Verlag, 1983.

NEURAL GRAFTING IN THE MAMMALIAN CNS. Dirigido por Anders Björklund y Ulf Stenevi. Elsevier Science Publishers, 1985.

CHOLINERGIC VENTRAL FOREBRAIN GRAFTS INTO THE NEOCORTEX IMPROVE PASSIVE AVOIDANCE MEMORY IN A RAT MODEL OF ALZHEIMER DISEASE. Alan Fine, S. B. Dunnett, A. Björklund y S. D. Iversen en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, volumen 82, n.º 15, págs. 5227-5230; agosto de 1985.

AVANCES EN LA FUSION POR LASER

LASER COMPRESSION OF MATTER TO SUPER-HIGH DENSITIES: THERMONUCLEAR (CTR) APPLICATIONS. John Nuckolls, Lowell Wood, Albert Thiessen y George Zimmerman en *Nature*, vol. 239, n.º 5368, págs. 139-142; 15 de septiembre de 1972.

LASER-DRIVEN FUSION. Keith A. Brueckner y Siebe Jorna en *Reviews of Modern Physics*, vol. 46, n.º 2, págs. 325-367; abril de 1974.

QUANTUM ELECTRONICS. Amnon Yariv. John Wiley & Sons, Inc., 1975.

AN OVERVIEW OF INERTIAL FUSION REACTOR DESIGN. M. J. Monsler, J. Hovingh, D. L. Cook, T. G. Frank y G. A. Moses en *Nuclear Technology/Fusion*, vol. 1, n.º 3, págs. 302-358; julio de 1981.

EL ORIGEN DEL MAIZ

CORN: ITS ORIGIN, EVOLUTION, AND IMPROVEMENT. Paul C. Mangelsdorf. Harvard University Press, 1974.

ZEA *DIPLOPERENNIS* (GRAMINEAE): A NEW TEOSINTE FROM MEXICO. Hugh H. Iltis, John F. Doebley, Rafael Guzmán M. y Batia Pazy en *Science*, vol. 203, n.º 4376, págs. 186-188; 12 de enero de 1979.

THE MYSTERY OF CORN: NEW PERSPECTIVES. Paul C. Mangelsdorf en *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 127, n.º 4, páginas 215-247; agosto de 1983.

THE ARCHAEOLOGICAL RECORD ON THE PROBLEM OF THE DOMESTICATION OF CORN. R. S. MacNeish en *Maydica*, vol. 30, págs. 171-178; 1985.

FRAGILIDAD DE LA PLUVISELVA AMAZONICA

THE TROPICAL RAIN FOREST: A NON-RENEWABLE RESOURCE. A. Gómez-Pompa, A. C. Vázquez-Yanes e Y. S. Guevara en *Science*, vol. 177, págs. 762-765; 1972.

TROPICAL SUCCESSION. Dirigido por J. Ewel en *Biotropica*. vol. 12, páginas 1-95; 1980.

AMAZONIA. Dirigido por G. T. Prance y T. E. Lovejoy. Key Environments Series, Pergamon Press; 1985.

THE PRIMARY SOURCE. N. Myers. W. W. Norton & Co., 1985.

NICHOS TERMICOS DE LA LUBINA LISTADA

SYNOPSIS OF BIOLOGICAL DATA ON STRIPED BASS, *MORONE SAXATILIS* (WALBAUM). E. M. Setzler et al. NOAA Technical Report, National Marine Fisheries Service Circular 433, Departamento de Comercio de los Estados Unidos; junio de 1980.

STRIPED BASS: ENVIRONMENTAL RISKS IN FRESH AND SALT WATER. *Transactions of the American Fisheries Society*, número especial del simposium, dirigido por Charles C. Coutant, vol. 114, n.º 1; enero de 1985.

EL NACIMIENTO DE LA CIVILIZACION MAYA

SOCIAL PROCESS IN MAYA PREHISTORY. Dirigido por Norman Hammond. Academic Press, 1977.

ANCIENT MAYA CIVILIZATION. N. Hammond. Rutgers Univ. Press, 1982.

JUEGOS DE ORDENADOR

THE CONJURER'S CALCULATOR (MAGIC WITH A POCKET COMPUTER). John C. Sherwood. Micky Hades International, Box 476, Calgary, Alberta, 1976.

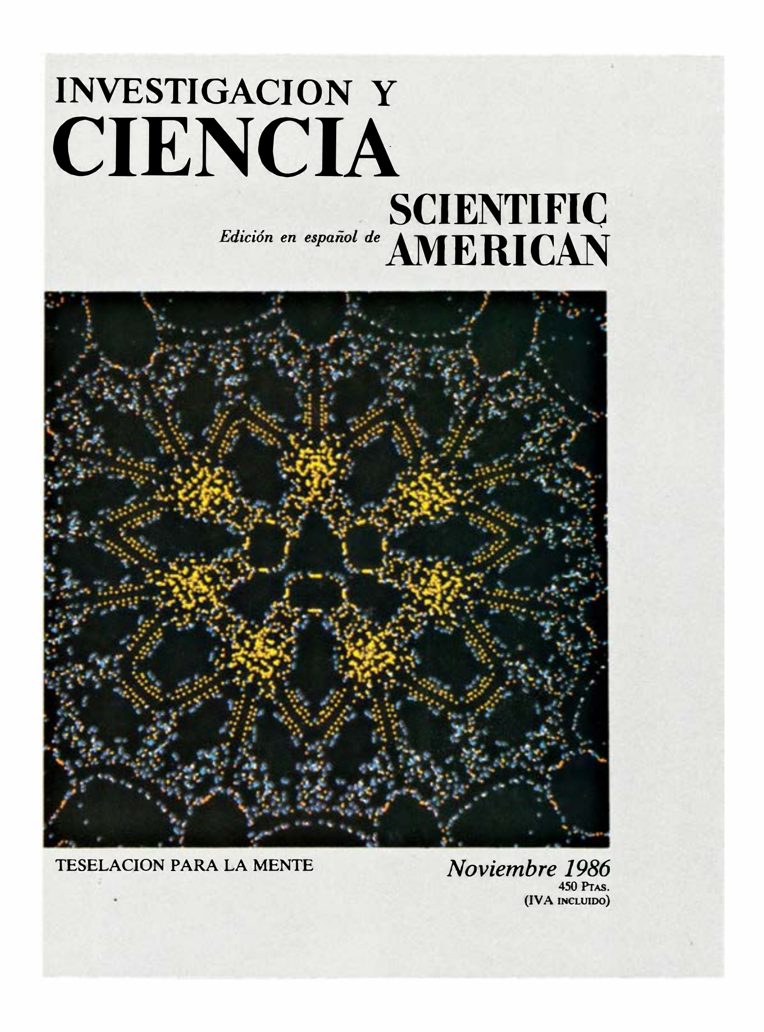
THE MAGIC BOOK: THE COMPLETE BEGINNER'S GUIDE TO ANYTIME, ANYWHERE, SLEIGHT-OF-HAND MAGIC. Putnam Publishing, 1977.

TALLER Y LABORATORIO

THE IMMORTAL WOODSHED: THE STORY OF THE INVENTOR WHO BROUGHT ALUMINUM TO AMERICA. Junius David Edwards. Dodd, Mead, 1955.

CHARLES MARTIN HALL - THE YOUNG MAN, HIS MENTOR, AND HIS METAL. N. C. Craig en *Journal of Chemical Education*, vol. 63, n.º 7; julio, 1986.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



PREDICCION DE LAS CARACTERISTICAS QUIMICAS A PARTIR DE LA TOPOLOGIA, por Dennis H. Rouvray
Ciertos métodos que se fundamentan en la topología de las moléculas, sin entrar en la consideración de sus formas tridimensionales, logran predecir un amplio abanico de propiedades.

LA BARRERA HEMATOENCEFALICA, por Gary W. Goldstein y A. Lorris Betz
Los capilares cerebrales se distinguen de los que irrigan los demás órganos. Sus propiedades características les permiten actuar de celadores que guardan el paso entre la sangre y el cerebro.

SUPERCUERDAS, por Michael B. Green
Cuando las partículas elementales se tratan cual si fueran cuerdas, surge una teoría cuántica potente que explica las cuatro fuerzas fundamentales. Tal teoría podría transformar nuestras nociones sobre el espacio y el tiempo.

LA FIABILIDAD DE LA CIENCIA, por Evandro Agazzi, Mariano Artigas y Gerard Radnitzky
Creatividad y control son las claves del método experimental. Nos permiten obtener conocimientos objetivos mediante teorías abstractas y provisionales.

EL COLOR DE LOS OBJETOS, por Philippe Brou, Thomas R. Sciascia, Lynette Linden y Jerome Y. Lettvin
"Ilusiones" ópticas cromáticas presentadas sobre la pantalla de un ordenador demuestran que el color no se percibe sólo por la detección de la luz dimanante de las superficies de la escena.

EL PROBLEMA DE LAS MICROONDAS, por Kenneth R. Foster y Arthur W. Guy
¿Constituye un peligro la exposición a bajos niveles de microondas? ¿Qué límites de exposición deben establecerse? La cuestión sigue constituyendo objeto de debate, en parte porque algunos hallazgos sobre los efectos biológicos de las microondas resultan obscuros.

BRAQUIOPODOS, por Joyce R. Richardson
Entre esas criaturas con apariencia de bivalvos se distinguen dos clases. Una sobrevive escogiendo ambientes que resulten adecuados a sus características, invariables. Otra adapta su forma y conducta al entorno local.

CONTRIBUCIONES DE LEONARDO A LA MECANICA TEORICA, por Vernard Foley y Werner Soedel
El estudio detenido de su modo de razonar, caracterizado por lo visual, en especial sus análisis de las ballestas, revela que sus nociones se fundamentan en la evolución de cuatro aspectos de la mecánica.

